

# Project DIFISEK

## WP3: Mechanisches Verhalten

B. ZHAO

CTICM – Centre Technique de la Construction Métallique, France

### 1 EINFÜHRUNG: ANALYSE DES MECHANISCHEN VERHALTENS VON TRAGWERKEN IM BRANDFALL

Das mechanische Verhalten von Tragwerken kann als letztes Glied einer Ereigniskette im Brandfall gesehen werden (siehe Abbildung 1). Es ist gleichzeitig einer der wichtigsten Ereignisse im Brandfall.

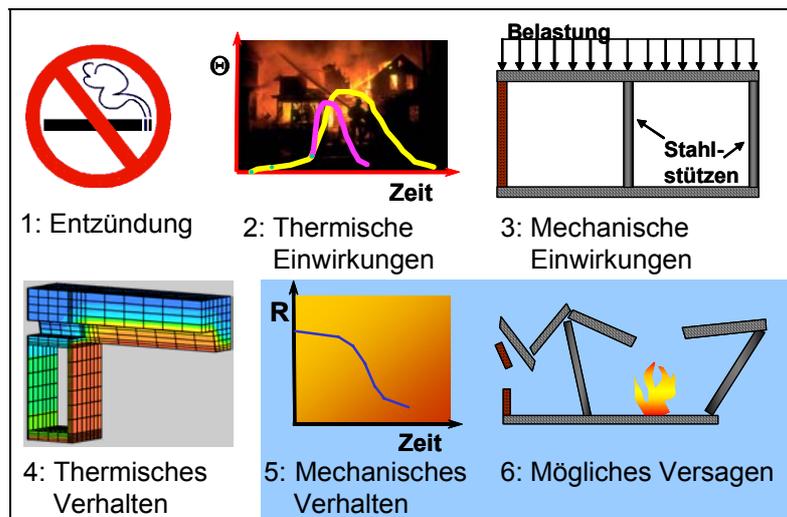


Abbildung 1 Widerstand im Brandfall – eine Reihe von Ereignissen

Generell lässt sich die Reaktion des Tragwerks auf den Brand in folgende Punkte zusammenfassen (siehe auch Abbildung 2):

- Der Temperaturanstieg im Tragwerk/Bauteil wird auch thermisches Verhalten durch Wärmetübertragung vom Brand genannt.
- Wenn das Tragwerk erhitzt wurde, wird es sich entsprechend der thermischen Dehnung ausdehnen.
- Gleichzeitig wird das Material des Tragwerks durch die Erhitzung „weicher“ und verliert an Festigkeit und Steifigkeit. Dies zieht eine weitere Tragwerksverformung nach sich.
- In einigen Fällen bewirkt der Verlust von Festigkeit und Steifigkeit ein Versagen des Tragwerks, da dies die Lasten nicht mehr tragen kann

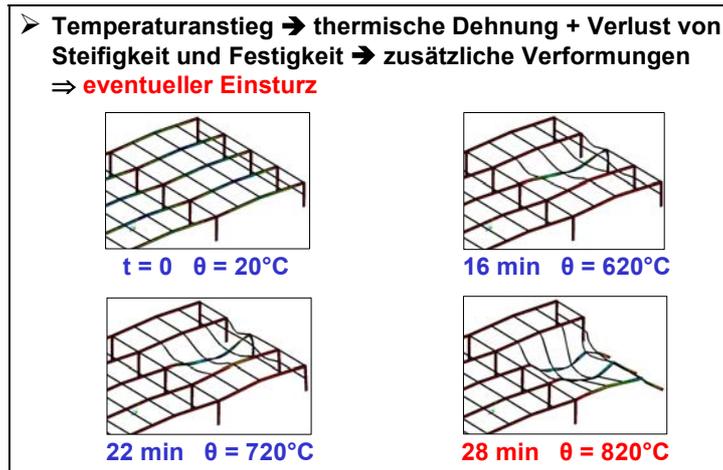


Abbildung 2 Verhalten von Tragwerken im Brandfall

Das allgemeine Verhalten von Tragwerken im Brandfall ist nicht schwer zu verstehen. Um ein Versagen im Brandfall ausschließen zu können, ist es für einen Ingenieur sehr wichtig das exakte Verhalten des Tragwerks im Brandfall vorherzusagen. Im Brandschutzingenieurwesen gibt es momentan zwei grundsätzliche Bemessungsansätze um das mechanische Verhalten von Tragwerken im Brandfall zu beschreiben (siehe Abbildung 3).

- Das Durchführen von Versuchen ist immer möglich um das mechanische Verhalten von Tragwerken oder Bauteilen im Brandfall zu bestimmen. Abgesehen von den Kosten, sind Versuche immer eine brauchbare Methode um Bauteile oder Tragwerke im Brandfall zu untersuchen.
- Auf der anderen Seite wird es mehr und mehr üblich, das mechanische Verhalten über Bemessungsregeln zu bestimmen. Diese Methode stellt auch den Schwerpunkt dieser Arbeit dar

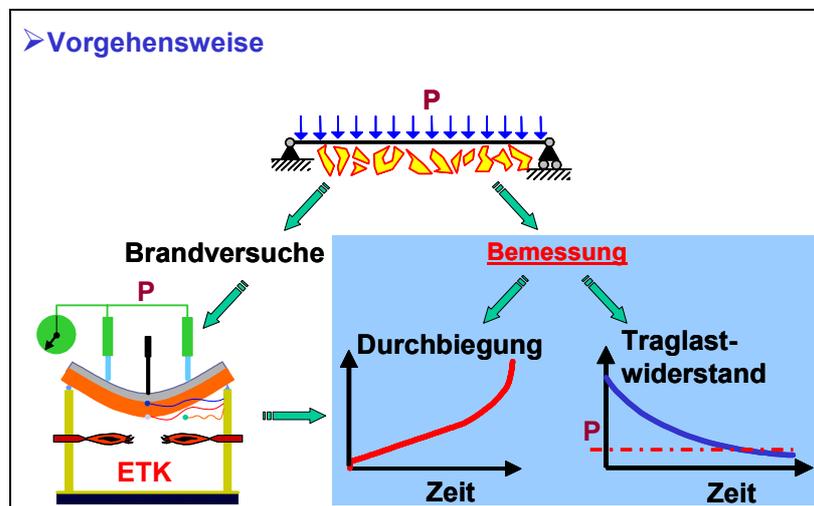


Abbildung 3 Beurteilung des mechanischen Verhaltens von Tragwerken unter Brandbeanspruchung

## 2 ALLGEMEINE ANWENDUNGSGRUNDSÄTZE ZUR BRANDSCHUTZ-TECHNISCHEN BEMESSUNG VON STAHL- UND STAHLVERBUND-TRAGWERKEN

### 2.1 Grundlegende Kenntnisse zur brandschutztechnischen Bemessung von Stahl- und Stahlverbundtragwerken

Die Bemessung im Brandfall z.B. nach den Eurocodes stellt einen wichtigen Bestandteil im Stahl- und Verbundbau dar. Dazu sind gute Kenntnisse in folgenden Punkten erforderlich:

- Die mechanische Belastung des Tragwerks im Brandfall
- Die temperaturabhängigen Materialeigenschaften wie z.B. Spannungs-Dehnungsbeziehung, Elastizitätsmodul, Streckgrenze, ...
- Verschieden Möglichkeiten der Tragwerksbemessung und deren Anwendungsgrenzen wie z.B. vereinfachte und allgemeine Berechnungsverfahren
- Berücksichtigung von Konstruktionsdetails die in der „normalen“ Brandschutzbemessung unberücksichtigt bleiben aber zur Sicherstellung der Tragfähigkeit im Brandfall essentiell sind

### 2.2 Mechanische Lasten – Kombinationsregeln nach den Eurocodes

Die mechanischen Belastungen des Tragwerks können nach der folgenden Kombinationsregel ermittelt werden (siehe EN 1990, Gleichung 6.11b):

$$\sum_{i \geq 1} G_{k,i} + (\Psi_{1,1} \text{ or } \Psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Dabei sind:

$G_{k,j}$ : charakteristischer Wert einer ständigen Einwirkung

$Q_{k,1}$ : charakteristische Wert der führenden veränderlichen Einwirkung

$Q_{k,i}$ : charakteristische Wert der begleitenden veränderlichen Einwirkungen

$\Psi_{1,1}$ : Kombinationsbeiwert für den häufigen Anteil der veränderlichen Einwirkung

$\Psi_{2,i}$ : Kombinationsbeiwert für den quasi-ständigen Anteil der veränderlichen Einwirkung

Die empfohlenen Werte von  $\Psi_1$  und  $\Psi_2$  sind dem EN 1990 Tabelle A1.1 zu entnehmen, sie können aber in Nationalen Anwendungsdokumenten modifiziert werden.

**Table A1.1 - Recommended values of  $\psi$  factors for buildings**

Action	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Imposed loads in buildings, category (see EN 1991-1-1)			
Category A : domestic, residential areas	0,7	0,5	0,3
Category B : office areas	0,7	0,5	0,3
Category C : congregation areas	0,7	0,7	0,6
Category D : shopping areas	0,7	0,7	0,6
Category E : storage areas	1,0	0,9	0,8
Category F : traffic area, vehicle weight $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Category G : traffic area, $30\text{kN} < \text{vehicle weight} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Category H : roofs	0	0	0
Snow loads on buildings (see EN 1991-1-3)*			
Finland, Iceland, Norway, Sweden	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H > 1000$ m a.s.l.	0,70	0,50	0,20
Remainder of CEN Member States, for sites located at altitude $H \leq 1000$ m a.s.l.	0,50	0,20	0
Wind loads on buildings (see EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Temperature (non-fire) in buildings (see EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
NOTE The $\psi$ values may be set by the National annex. * For countries not mentioned below, see relevant local conditions.			

Eine weitere gängige Methode zur Lastermittlung im Brandfall nach Eurocode, ist die Verwendung des Ausnutzungsgrads im Brandfall  $\eta_{fi,t}$ .

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{E_d}$$

Dabei sind

$E_d$ : Bemessungswert der Einwirkung bei Normaltemperatur

$E_{d,fi}$ : Bemessungswert der Einwirkung im Brandfall

Alternativ kann der Ausnutzungsgrad wie folgt ermittelt werden:

$$\eta_{fi,t} = \frac{G_k + \psi_{fi,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}}$$

Dabei ist  $\gamma_{Q,1}$  der Teilsicherheitsbeiwert für die führende veränderliche Einwirkung.

Der Ausnutzungsgrad  $\eta_{fi}$  hängt stark vom Kombinationsfaktor  $\psi_{1,1}$  ab, der Abhängig von der Art der Gebäudenutzung ist. Die Abbildung 4 (aus EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2) zeigt deutlich den Einfluss des Lastverhältnisses  $Q_{k,1}/G_k$  und des Kombinationsfaktors  $\psi_{1,1}$  auf den Ausnutzungsgrad.

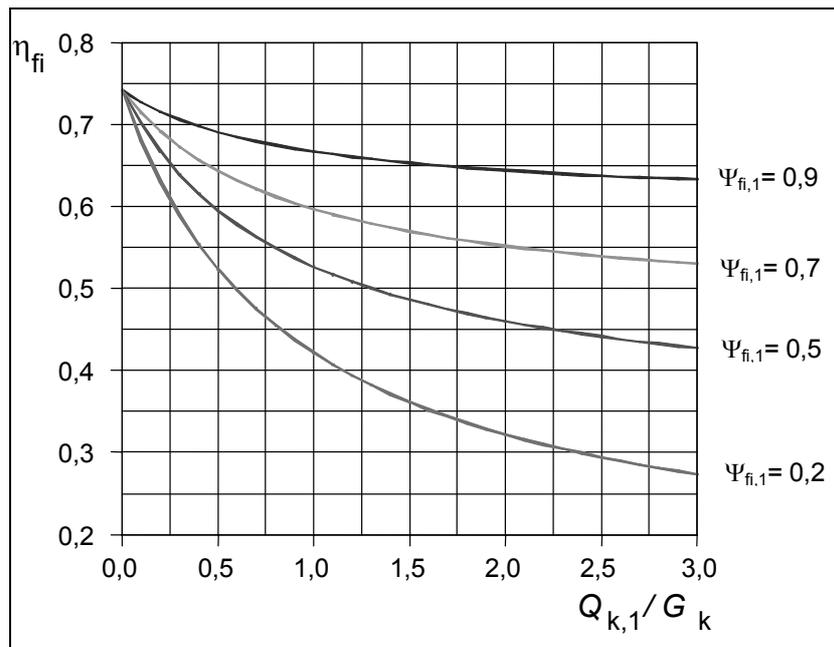


Abbildung 4 Verlauf des Reduktionsfaktors  $\eta_{fi}$  in Abhängigkeit des Lastverhältnisses  $Q_{k,1} / G_k$

Zusätzlich zu oben genannten Methode zu Berechnung des Ausnutzungsgrads  $\eta_{fi,t}$ , existiert ein praktikablerer und realistischerer Ansatz:

$$\eta_{fi,t} = \frac{E_{d,fi}}{R_d}$$

Dabei ist  $R_d$  die Grenztragfähigkeit für die Bemessung bei Normaltemperatur, und im Grenzzustand gilt  $E_d \leq R_d$ .

Diese Methode zur Ermittlung des Ausnutzungsgrades ist unabhängiger von der Belastung im Kaltfall und führt zu wirtschaftlicheren Ergebnissen.

## 2.3 Mechanische Werkstoffeigenschaften von Stahl- und Stahlverbundtragwerken im Brandfall

### 2.3.1 Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Stahl bei erhöhten Temperaturen

Die hauptsächlichen Materialien die bei Stahl- und Verbundtragwerken verwendet werden sind Stahl und Beton. In EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2 sind die Materialeigenschaften der Baustoffe im Brandfall angegeben. Abbildung 5 zeigt Die Abnahme der Festigkeit und Steifigkeit so wie die Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Stahls bei erhöhten Temperaturen. Es ist erkennbar, dass die Festigkeit und Steifigkeit ab 400 °C abnimmt. Bei einer Temperatur von 600 °C ist die Steifigkeit auf ca. 70 % und die Festigkeit auf ca. 50 % reduziert.

Die Materialeigenschaften von Stahl bei erhöhten Temperaturen werden im EN 1993-1-2 Tabelle 3.1 und Abbildung 3.1 ausführlich beschrieben.

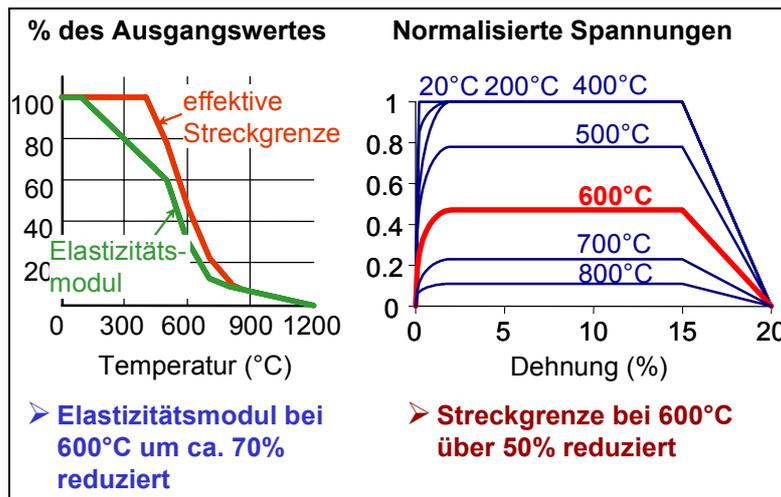
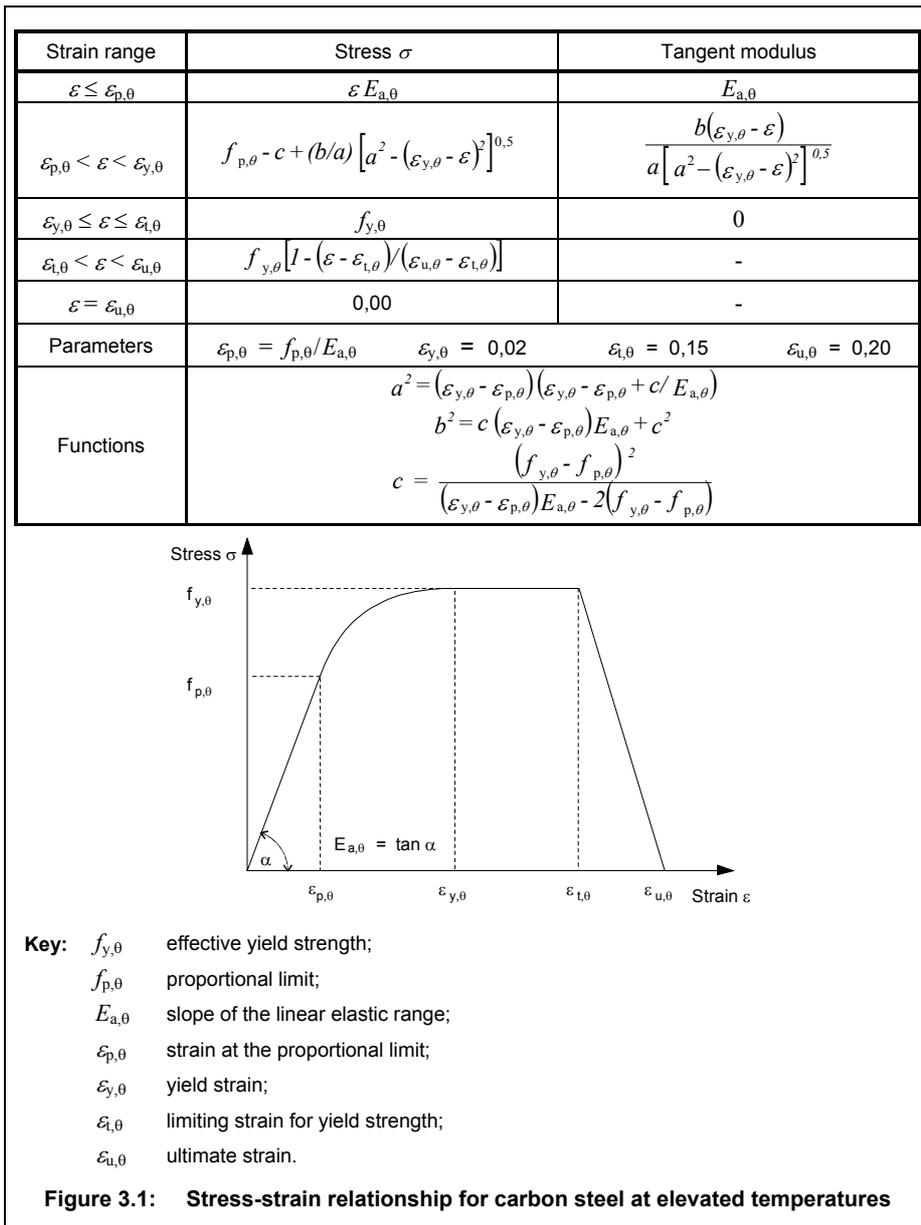


Abbildung 5 Werkstoffeigenschaften von Baustahl bei erhöhten Temperaturen

**Table 3.1: Reduction factors for stress-strain relationship of carbon steel at elevated temperatures**

Steel temperature $\theta_a$	Reduction factors at temperature $\theta_a$ relative to the value of $f_y$ or $E_a$ at 20 °C		
	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for effective yield strength $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to $f_y$ ) for proportional limit $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Reduction factor (relative to $E_a$ ) for the slope of the linear elastic range $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

**NOTE:** For intermediate values of the steel temperature, linear interpolation may be used.



### 2.3.2 Spannungs-Dehnungsbeziehungen von Beton bei erhöhten Temperaturen

Die mechanischen Eigenschaften des Betons bei erhöhten Temperaturen können dem EN 1994-1-2 entnommen werden (siehe Abbildung 6). Bei genauerer Betrachtung der Abminderungskurve der Druckfestigkeit fällt auf, dass diese ähnlich wie die Streckgrenze des Stahls bei 600 °C auf ca. 50 % reduziert wird.

Die Materialeigenschaften von Beton bei erhöhten Temperaturen werden im EN 1994-1-2 Tabelle 3.1 und Abbildung 3.1 ausführlich beschrieben

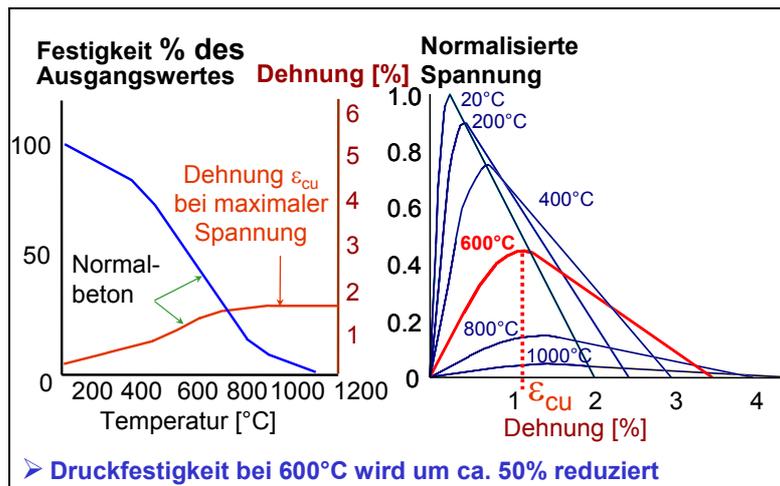


Abbildung 6 Mechanische Eigenschaften von Normalbeton bei erhöhten Temperaturen

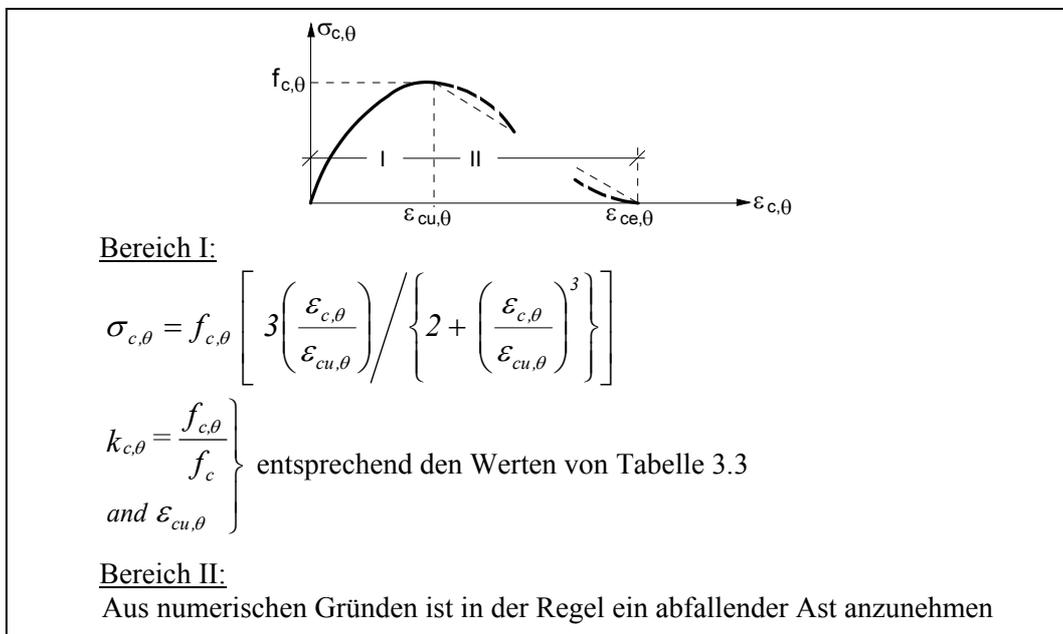


Abbildung 3.2: Mathematisches Modell für die Spannungs-Dehnungsbeziehung von Beton unter Druckbeanspruchung bei erhöhten Temperaturen

**Table 3.3: Values for the two main parameters of the stress-strain relationships of normal weight concrete (NC) and light weight concrete (LC) at elevated temperatures**

Concrete Temperature $\theta_c$ [°C]	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_c$		$\varepsilon_{cu,\theta} \cdot 10^3$ NC
	NC	LC	
20	1	1	2,5
100	1	1	4,0
200	0,95	1	5,5
300	0,85	1	7,0
400	0,75	0,88	10,0
500	0,60	0,76	15,0
600	0,45	0,64	25,0
700	0,30	0,52	25,0
800	0,15	0,40	25,0
900	0,08	0,28	25,0
1000	0,04	0,16	25,0
1100	0,01	0,04	25,0
1200	0	0	-

### 2.3.3 Thermische Dehnung von Stahl und Beton

Parallel zu den mechanischen Materialeigenschaften ist die thermische Dehnung der Materialien im Brandschutzingenieurwesen insbesondere bei allgemeinen Berechnungsmodellen zu berücksichtigen.

Die Eurocodes EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2 empfehlen die Verwendung der in Abbildung 7 dargestellten Dehnungskurven für Stahl und Beton.

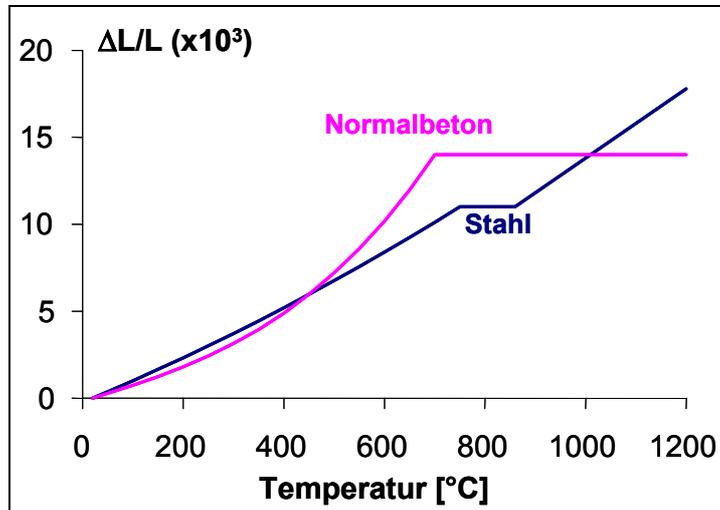


Abbildung 7 Thermische Dehnung von Stahl und Beton (EN1992-1-2, EN1993-1-2 und EN1994-1-2)

Die genauen Gleichungen für die oben dargestellten Kurven sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Steel	$\Delta l / l = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2$	for $20^\circ\text{C} < \theta_a \leq 750^\circ\text{C}$
	$\Delta l / l = 11 \cdot 10^{-3}$	for $750^\circ\text{C} < \theta_a \leq 860^\circ\text{C}$
	$\Delta l / l = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5} \theta_a$	for $860^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$
	Or in simple way $\Delta l / l = 14 \cdot 10^{-6} (\theta_a - 20)$	
Concrete	$\Delta l / l = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta_c + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta_c^3$	for $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C}$
	$\Delta l / l = 14 \cdot 10^{-3}$	for $700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$
	Or in simple way $\Delta l / l = 18 \cdot 10^{-6} (\theta_c - 20)$	
where	$l$	is the length at $20^\circ\text{C}$ of the steel or concrete member
	$\Delta l$	is the temperature induced elongation of the steel or concrete member
	$\theta_a$ et $\theta_c$	are respectively the steel or concrete temperature

#### 2.4 Bemessungsansatz für das mechanische Verhalten von Tragwerken im Brandfall

Zur Bemessung von Tragwerken im Brandfall können folgende drei Ansätze gewählt werden (siehe auch Abbildung 8):

- Bei der Bauteilanalyse wird ein Bauteil vom Rest des Tragwerks losgelöst und mit entsprechenden Randbedingungen bemessen.
- Bei der Analyse von Teiltragwerken wird ein Teil des Gesamttragwerks losgelöst und mit entsprechenden Randbedingungen bemessen.
- Bei der globalen Tragwerksanalyse wird das Tragwerk im Ganzen bemessen

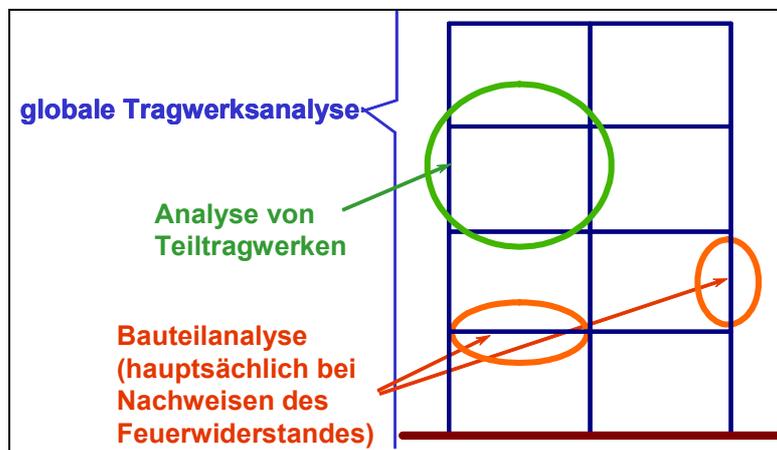


Abbildung 8 Verschiedene Bemessungsansätze für das mechanische Verhalten von Tragwerken im Brandfall

Hinsichtlich der o.g. Bemessungsansätze für den Brandfall sind folgende Anmerkungen zu machen:

- Die Bauteilanalyse wird Bauteil für Bauteil des Tragwerks durchgeführt. Unter Normbrandbedingungen existieren hierfür vereinfachte Berechnungsverfahren. Dies ist die gängigste Bemessungsmethode.
- Bei der Analyse von Teiltragwerken oder gesamten Tragwerken kann eine Interaktion zwischen verschiedenen Bauteilen berücksichtigt werden. So kann z.B. eine

Lastumlagerung von heißen Bauteilen (geschwächt durch den Brand im Brandabschnitt) zu kalten Bauteilen (außerhalb des Brandabschnittes) berücksichtigt werden, und so ein realistischeres Ergebnis des Tragwerksverhaltens im Brandfall darstellt..

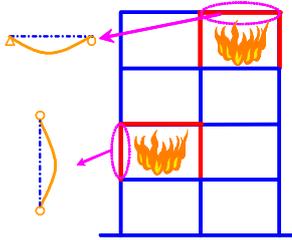
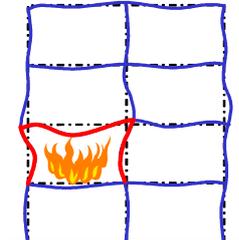
<b>Bauteilanalyse</b>	<b>globale Tragwerksanalyse</b>
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>unabhängige Bauteilanalyse</b></li> <li>➤ <b>einfach anzuwenden</b></li> <li>➤ <b>Standardverfahren für Brandschutzbemessung</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Interaktionen zwischen verschiedenen Tragwerksteilen</b></li> <li>➤ <b>Funktion des betrachteten Abschnittes</b></li> <li>➤ <b>globale Stabilität</b></li> </ul>

Abbildung 9 Vergleich von verschiedenen Bemessungsansätzen für das mechanische Verhalten von Tragwerken im Brandfall

In den Eurocodes existieren drei verschiedene Berechnungsverfahren zur Bemessung von Stahl- und Verbundtragwerken im Brandfall. Zwei dieser Verfahren sind ausschließlich auf die Bauteilanalyse anwendbar:

- Das tabellarische Bemessungsverfahren bezieht sich auf Tabellen, in denen Mindestabmessungen angegeben sind. Dies Verfahren ist nur für Verbundbauteile verfügbar.
- Bei dem vereinfachten Berechnungsverfahren kann die Bemessung auf zwei Ebenen erfolgen. Auf Temperaturebene wird nachgewiesen, ob das Bauteil unter einer kritischen Temperatur bleibt. Auf Tragfähigkeitsebene können Stahl- und Verbundbauteile auf ihre Tragfähigkeit im Brandfall bemessen werden.
- Allgemeine Berechnungsverfahren können nicht nur auf Bauteile, sondern auch auf Teiltragwerke und gesamte Tragwerke angewendet werden. Sie basieren meistens auf die Finite Elemente oder Finite Differenzen Methoden. Im modernen Brandschutzingenieurwesen wird dieses Berechnungsverfahren mehr und mehr genutzt, da sich eine Vielzahl von Vorteilen aus ihnen ergeben.

Bevor die verschiedenen Verfahren genauer beschrieben werden, ist es wichtig zu wissen, wann welches Berechnungsverfahren angewendet werden kann. Abbildung 10 zeigt die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der drei Berechnungsverfahren unter Verwendung von nominellen Brandkurven. Für eine Bauteilanalyse können alle drei Verfahren angewendet werden. In sehr seltenen Fällen kann das vereinfachte Berechnungsverfahren auf Teiltragwerke angewendet werden, wie z.B. bei Rahmen. Daher kann gesagt werden, dass das vereinfachte Berechnungsverfahren praktisch nur für Bauteilanalysen geeignet ist. Gesamte Tragwerke können normalerweise selbst unter nomineller Brandbeanspruchung nur mit allgemeinen Berechnungsverfahren berechnet werden.

➤ **Thermische Einwirkung durch nominelle Feuer**



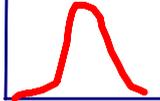
Art der Analyse	tabellarisches Verfahren	vereinfachtes Berechnungsverfahren	allgemeines Berechnungsverfahren
<b>Bauteilanalyse</b>	Ja	Ja	Ja
<b>Analyse eines Teiltragwerks</b>	keine Angabe	Ja (wenn verfügbar)	Ja
<b>Analyse des gesamten Tragwerks</b>	keine Angabe	keine Angabe	Ja

Abbildung 10 Anwendungsfelder der verschiedenen Bemessungsmethoden unter Normbrandbedingungen

Unter Naturbrandeinwirkung sind die Anwendungsmöglichkeiten der Berechnungsverfahren viel stärker eingeschränkt als unter nomineller Brandeinwirkung. Der Grund ist, dass die vereinfachten Berechnungsverfahren für nominelle Brandmodelle entworfen wurden und der Erwärmungsverlauf sich stark von dem der Naturbrandmodelle unterscheidet. Aus diesem Grund ist in Abbildung 11 zu erkennen, dass die vereinfachten Berechnungsverfahren nur in einem speziellen Fall angewendet werden kann, nämlich bei einem vollständig beflamnten geschützten oder ungeschützten Stahlbauteil.

Allgemeine Berechnungsverfahren unterliegen weiterhin keinen Beschränkungen. Sie können das mechanische und auch das thermische Verhalten von Bauteilen und Tragwerken unter beliebigen thermischen Einwirkungen berechnen. Dabei wird das vom Nutzer definierte Materialmodell berücksichtigt.

➤ **Thermische Einwirkung durch Naturbrände**



Art der Analyse	tabellarisches Verfahren	vereinfachtes Berechnungsverfahren	allgemeines Berechnungsverfahren
<b>Bauteilanalyse</b>	keine Angabe	Ja (wenn verfügbar)	Ja
<b>Analyse eines Teiltragwerks</b>	keine Angabe	keine Angabe	Ja
<b>Analyse des gesamten Tragwerks</b>	keine Angabe	keine Angabe	Ja

Abbildung 11 Anwendungsfelder der verschiedenen Bemessungsmethoden unter Naturbrandbedingungen

Alle oben beschriebenen Berechnungsverfahren werden ausführlich in den Eurocodes beschrieben (siehe Abbildung 12)

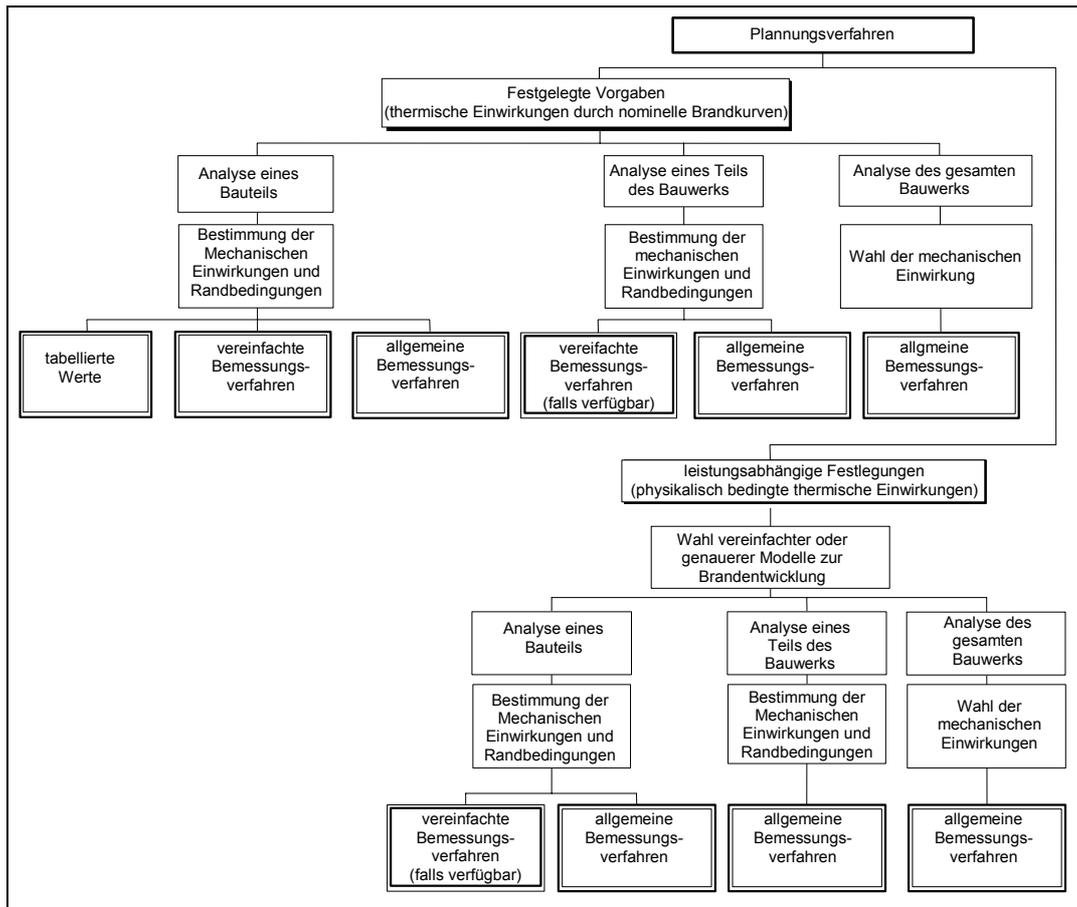


Abbildung 12 Alternative Bemessungsabläufe

### 3 BESCHREIBUNG DER BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR DIE ANALYSE VON STAHL- UND VERBUNDBAUTEILEN

#### 3.1 Tabellarische Nachweisverfahren

Nachdem die Anwendungsgebiete der verschiedenen Berechnungsverfahren geklärt wurden, wird die Anwendung dieser Verfahren in diesem Kapitel beschreiben.

Das gängigste, weil auch am einfachsten anwendbare Verfahren ist das tabellarische Nachweisverfahren. Folgende Bauteile können mit diesem Verfahren bemessen werden (siehe auch Abbildung 13):

- kammerbetonierte Verbundträger und Verbundstützen
- Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen (mit runden oder rechteckigen Hohlprofilen)
- Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlprofilen

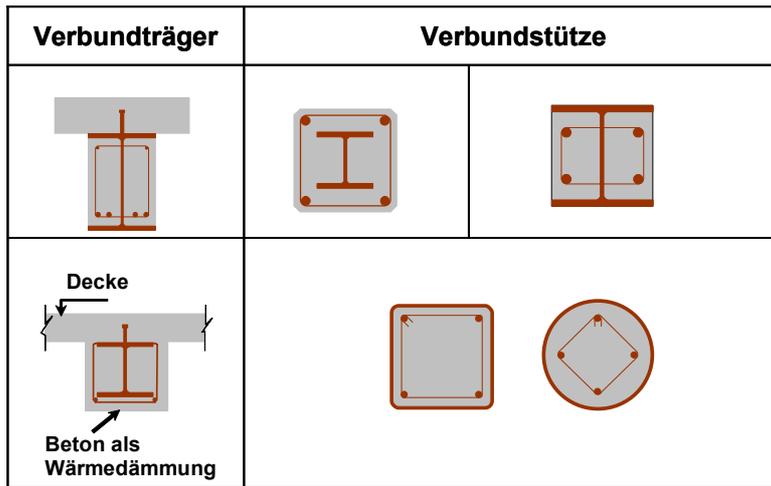


Abbildung 13 Anwendungsbereich von Tabellenverfahren in der Bemessung

Die Tabellen im Eurocode basieren hauptsächlich auf Versuchsergebnissen aus Brandversuchen und wurden durch analytische Untersuchungen weiter verfeinert. Alle in den Tabellen angegebenen Werte hängen voneinander ab.

Der größte Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es einfach zu handhaben ist. Die Ergebnisse liegen weiter auf der sicheren Seite als bei den anderen Berechnungsverfahren und sind somit geeignet zur Vorbemessung von Bauteilen, zur Abschätzung der Bauteilabmessungen.

		Feuerwiderstandsklasse			
		R30	R60	R90	R120
Mindestverhältnis von Steg- zu Flanschdicke $e_w/e_f$		0,5			
1	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor	$\eta_{fi,t} \leq 0,28$			
1.1	Mindestabmessungen h und b [mm]	160	200	300	400
1.2	Mindestabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	-	50	50	70
1.3	Mindestbewehrungsgrad $A_{s1}/(A_c+A_s)$ in %	-	4	3	4
2	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor	$\eta_{fi,t} \leq 0,47$			
2.1	Mindestabmessungen h und b [mm]	160	300	400	-
2.2	Mindestabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	-	50	70	-
2.3	Mindestbewehrungsgrad $A_{s1}/(A_c+A_s)$ in %	-	4	4	-
3	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor	$\eta_{fi,t} \leq 0,66$			
3.1	Mindestabmessungen h und b [mm]	160	400	-	-
3.2	Mindestabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	40	70	-	-
3.3	Mindestbewehrungsgrad $A_{s1}/(A_c+A_s)$ in %	1	4	-	-

Abbildung 14 Bemessungsmethode mit Tabellen (Beispiel einer kammerbetonierten Verbundstütze)

Das tabellarische Verfahren lässt sich für zwei verschiedene Zwecke verwenden. Wenn die Geometrie des Bauteils gegeben ist, kann diese brandschutztechnisch nachgewiesen werden. Wenn nur die Belastung bekannt ist, kann das Bauteil mit diesem Verfahren bemessen werden, das heißt die erforderlichen Dimensionen des Bauteils werden ermittelt.

Wenn ein Bauteil nachgewiesen wird, sind die Bauteilgeometrie und die Tragfähigkeit im Kaltfall  $R_d$  bekannt. Die Einwirkung im Brandfall  $E_{fi,d}$  ist zu ermitteln um den Ausnutzungsgrad  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d}/R_d$  des Bauteils zu berechnen. Mit diesem Ausnutzungsgrad und den geometrischen Parametern lässt sich die erreichbare Feuerwiderstandsdauer aus den Tabellen ablesen

Vor einer Bemessung sind die Querschnittsabmessungen des Bauteils unbekannt. Andererseits sind die Einwirkungen  $E_d$  und  $E_{fi,d}$  im Kalt- und Heißfall bereits definiert. Aus diesen lässt

sich der Ausnutzungsgrad  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / E_d$  errechnen und zusammen mit der geforderten Feuerwiderstandsdauer lassen sich die minimalen Abmessungen sowie erforderliche Konstruktionsbedingungen für das Bauteil ablesen. Dieser Querschnitt wird dann im Kaltfall auf seine Tragfähigkeit nachgewiesen ( $R_d \geq E_d$ ).

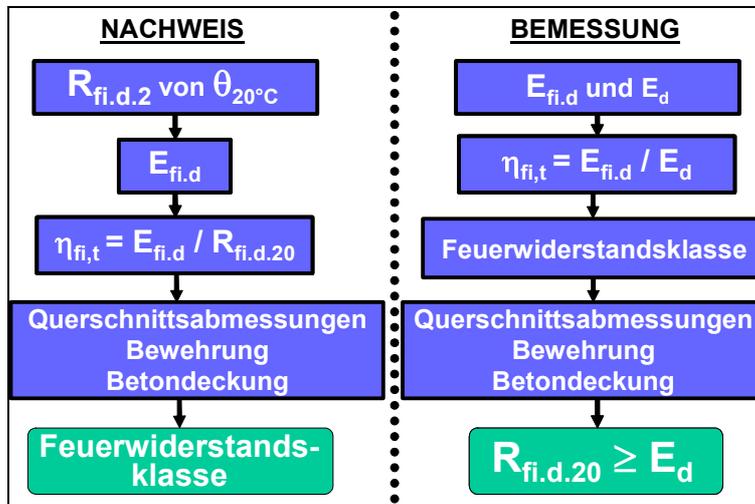


Abbildung 15 Anwendung von Tabellenverfahren in zwei unterschiedlichen Situationen

### 3.2 Vereinfachte Berechnungsverfahren

Die vereinfachten Berechnungsverfahren decken, verglichen mit dem tabellarischen Verfahren, ein größeres Anwendungsgebiet ab, da sie sowohl für Stahl- als auch Stahlverbundbauteile vorhanden sind.

Folgende Bauteile können mit vereinfachten Berechnungsverfahren berechnet werden (siehe auch Abbildung 16):

- Annähernd alle Stahlbauteile (z.B. Zugstäbe, Träger, Stützen, etc.) mit oder ohne passiver Brandschutzbekleidung
- Stahlverbundträger mit oder ohne Kammerbeton

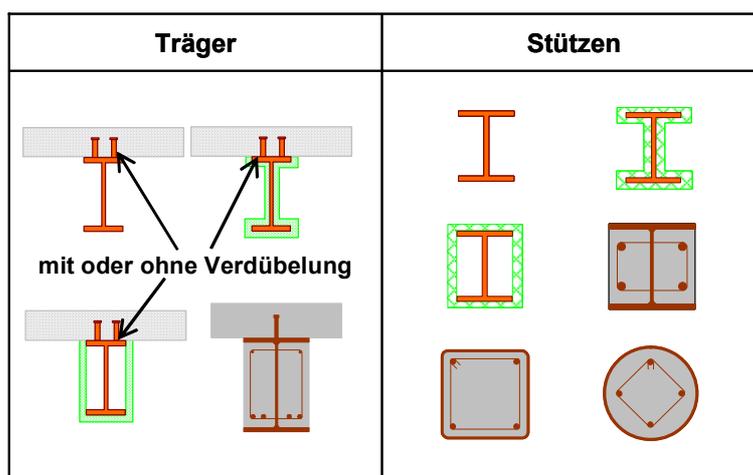


Abbildung 16 Anwendungsfelder für die vereinfachten Berechnungsverfahren

Das vereinfachte Berechnungsverfahren kann in folgende Bereiche unterteilt werden:

- Bei Bauteilen, die ausschließlich durch eine Normalkraft oder ein Biegemoment beansprucht werden und keine Stabilitätsprobleme aufweisen, wird der Nachweis wie ein plastischer Nachweis unter erhöhter Temperatur geführt.
- Bei Bauteilen unter Druckbeanspruchung mit Stabilitätsproblemen, wie z.B. schlanke Stützen, wird der Nachweis wie ein Knicknachweis im Brandfall geführt.
- Bei Bauteilen unter kombinierter Biege- und Druckbeanspruchung, wie z.B. exzentrisch belastete schlanke Stützen oder lange biegedrillknickgefährdete Träger, wird die Interaktion zwischen Biegung und Druck durch eine Kombination der beiden oben genannten Verfahren berücksichtigt

### 3.2.1 Beispiel zu vereinfachten Berechnungsverfahren – Stahlverbundträger im Brandfall

Ein typisches Beispiel für ein Bauteil ohne Stabilitätseinfluss ist ein Einfeldträger ausgeführt als Verbundträger (siehe Abbildung 17). In dem vereinfachten Berechnungsverfahren wird der Stahlquerschnitt zur Temperaturermittlung in drei Abschnitte aufgeteilt, dem Unterflansch, dem Steg und dem Oberflansch. Die Temperatur der Betondecke wird als eindimensionaler Temperaturgradient ermittelt. Mit den ermittelten Temperaturen kann dann die plastische Momententragfähigkeit des Querschnitts ermittelt werden und die Tragfähigkeit des Verbundträgers nachgewiesen werden.

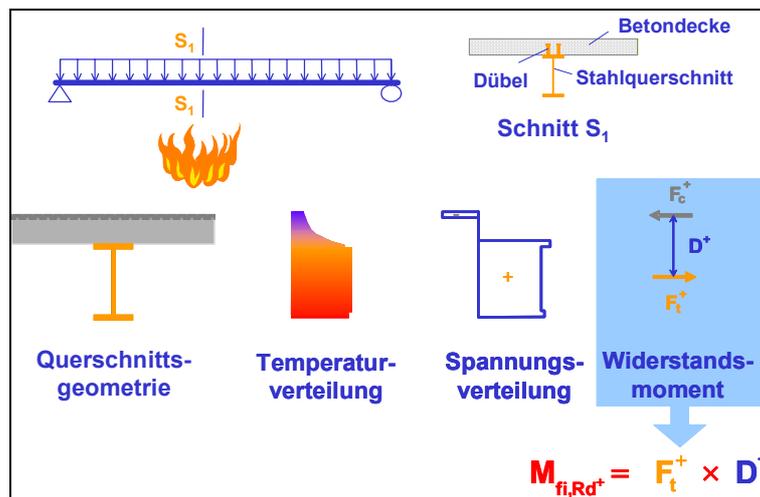


Abbildung 17 Beispiel eines Stahlverbundträgers unter Brandbeanspruchung

### 3.2.2 Beispiel zu vereinfachten Berechnungsverfahren – kammerbetonierte Stahlverbundstütze im Brandfall

Ein anderes typisches Beispiel zur Anwendung des vereinfachten Berechnungsverfahrens ist der Nachweis einer kammerbetonierten Verbundstütze (siehe Abbildung 18).

Folgende Punkte sind im Allgemeinen zu berücksichtigen:

- Die Tragfähigkeit kann vereinfacht als Normalkrafttragfähigkeit  $N_{fi,pl,Rd}$  kombiniert mit dem Abminderungsfaktor  $\chi(\bar{\lambda}_\theta)$  der entsprechenden Knickspannungskurve ermittelt werden.
- Der Abminderungsfaktor  $\chi(\bar{\lambda}_\theta)$  hängt von dem auf die plastische Querschnittssteifigkeit im Brandfall  $N_{fi,pl,Rd}$  bezogenen Schlankheitsgrad  $\chi(\bar{\lambda}_\theta)$ , der effektiven Biegesteifigkeit  $(EI)_{eff,fi}$  und der Knicklänge  $L_{fi}$  (alle im Brandfall) ab.

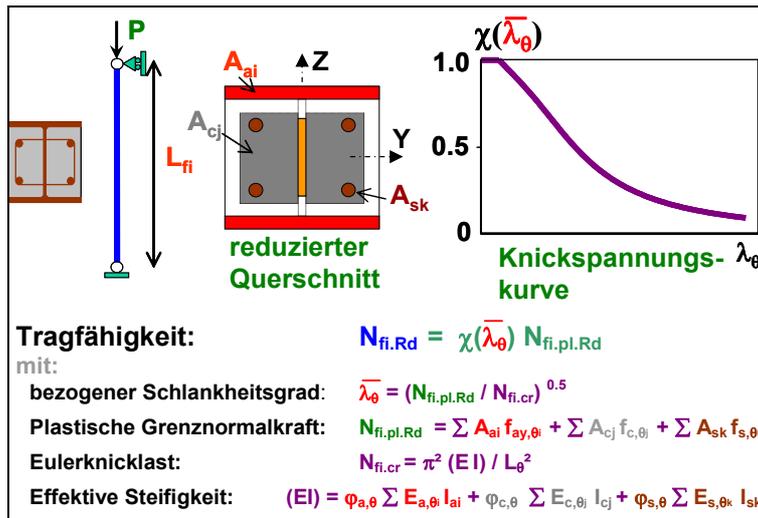


Abbildung 18 Beispiel für die Bemessungsmethode mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren für eine kammerbetonierte Verbundstütze

Es ist erkennbar, dass bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen nicht nur die Abnahme der Festigkeit eine Rolle spielt, sondern auch die Abnahme der Steifigkeit zu berücksichtigen ist.

### 3.3 Methode der kritischen Temperatur

Im EN 1993-1-2 und EN 1994-1-2 gibt es die Möglichkeit, ein Bauteil über seine kritische Temperatur nachzuweisen. Dieses Verfahren darf nur bei Bauteilen mit kleinen Temperaturgradienten im Stahlquerschnitt angewendet werden. Bei den folgenden Bauteilen ist dies der Fall (siehe auch Abbildung 19):

- Geschützte oder ungeschützte Stahlträger mit drei- oder vierseitiger Beflammung des Querschnitts
- Stahlstützen mit oder ohne passiven Brandschutzmaßnahmen mit allseitiger Beflammung
- Zugbauteile im Brandfall

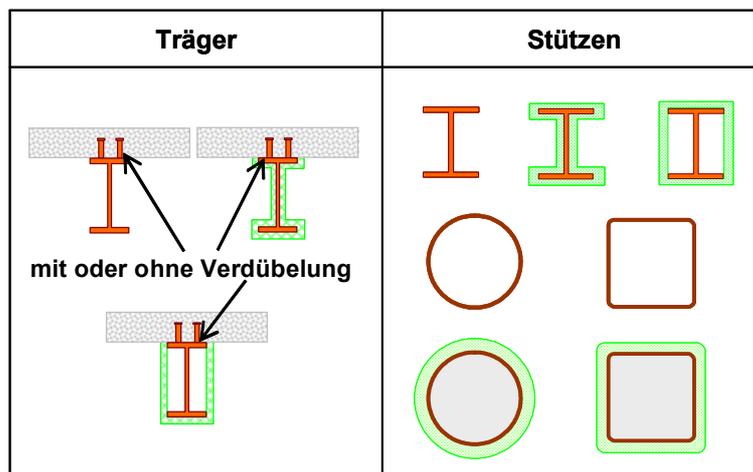


Abbildung 19 Anwendungsfelder für eine Bemessung über die kritische Temperatur

Das Nachweisverfahren über die kritische Temperatur basiert auf dem vereinfachten Berechnungsverfahren für Bauteile mit konstanter Querschnittstemperatur. Die Tragfähigkeit eines Bauteils im Brandfall  $R_{fi,d,t}$  kann in diesem Fall ermittelt werden, indem die Tragfähigkeit bei Raumtemperatur  $R_{fi,d,0}$  mit dem Abminderungsfaktor  $k_{y,\theta}$  multipliziert wird, denn es gilt  $R_{fi,d,t} \geq k_{y,\theta} R_{fi,d,0}$ .

Andererseits wird die Tragfähigkeit sichergestellt, wenn  $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d}$  ist. Mit der Beziehung  $R_{fi,d,t} \geq \mu_0 R_{fi,d,0}$  (siehe Abbildung 20) kann der Ausnutzungsgrad durch  $\mu_0 = E_{fi,d} / R_{fi,d,0}$  beschrieben werden. Um eine ausreichende Tragfähigkeit im Brandfall sicherzustellen, muss  $k_{y,\theta} \geq \mu_0$  sein. Für den Fall  $k_{y,\theta} = \mu_0$  (volle Ausnutzung der Tragfähigkeit im Brandfall) wird die zugehörige Temperatur als kritische Temperatur  $\theta_{cr}$  bezeichnet.

Diese kritische Temperatur kann auf der Grundlage der Werte für  $k_{y,\theta}$  gemäß EN 1993-1-2, Tabelle 3.1 ermittelt werden. In den meisten Fällen muss allerdings eine Interpolation zur Ermittlung der exakten kritischen Temperatur durchgeführt werden. Um dies zu vermeiden wurde eine Formel entwickelt, mit der die kritische Temperatur basierend auf dem Ausnutzungsgrad  $\mu_0$  schnell und einfach ermittelt werden kann:

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482$$

Ein Vergleich der beiden Kurven  $k_{y,\theta}$  und  $\mu_0$  (aufgetragen über der Temperatur) zeigt, dass diese nahezu identisch sind (siehe Abbildung 20). Dies zeigt die Gültigkeit dieser Formel für die Bestimmung der kritischen Temperatur eines entsprechenden Bauteils unter Brandbeanspruchung.

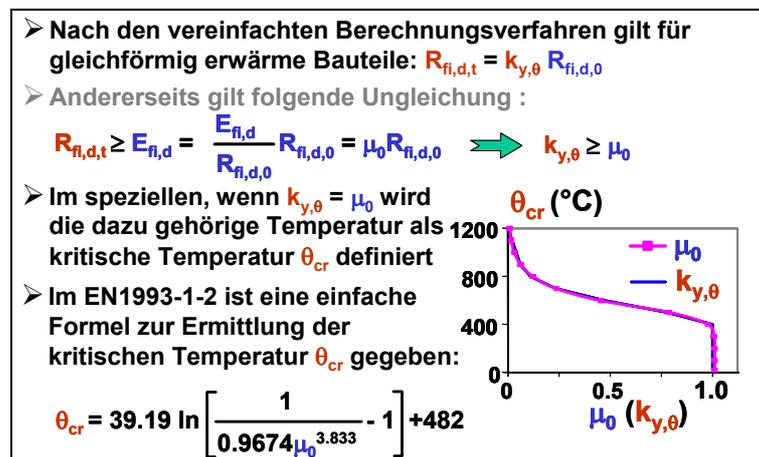


Abbildung 20: Vorgehensweise bei der Bemessung über die kritische Temperatur

Die brandschutztechnische Bemessung über die kritische Temperatur erfolgt nach den folgenden Schritten (siehe auch Abbildung 21):

1. Bestimmung der mechanischen Einwirkungen im Brandfall  $E_{fi,d}$
2. Berechnung der Tragfähigkeit  $R_d$  oder Einwirkung  $E_d$  im Kaltfall
3. Berechnung des Lastniveaus zu  $\eta_{fi,t} = E_{fi,d} / R_d$
4. Bestimmung des Ausnutzungsgrades durch  $\mu_0 = \eta_{fi,t} \gamma_{M,fi} / \gamma_M$
5. Berechnung der kritischen Temperatur  $\theta_{cr}$  direkt durch

$$\theta_{cr} = 39.19 \ln \left[ \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right] + 482 \quad \text{oder durch eine kleine iterative}$$

Anwendung in maximal zwei Iterationsschritten

Ein spezielles Augenmerk gilt der Berechnung des Ausnutzungsgrades  $\mu_0$  über das Lastniveau  $\eta_{fi,t}$ . Der Unterschied zwischen den Werten ist, dass der Ausnutzungsgrad  $\mu_0$  mit einer Tragfähigkeit im Brandfall  $R_{fi,d,0}$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  min berechnet wird Folglich wird der

Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_{M,fi}$  für den Brandfall unter Raumtemperatur verwendet. Das Lastniveau  $\eta_{fi,t}$  wird jedoch mit der Tragfähigkeit  $R_d$  für den Kaltfall und dem Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$ , der sich von  $\gamma_{M,fi}$  unterscheidet, berechnet. Deshalb folgt mit  $R_{fi,d,0} = R_d \gamma_M / \gamma_{M,fi}$  weiter:

$$\mu_0 = \frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi,0}} = \frac{E_{d,fi}}{R_d \gamma_M / \gamma_{M,fi}} = \frac{E_{d,fi}}{R_d} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M} = \eta_{fi,t} \frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_M}$$

Weiterhin ist festzustellen, dass der Ausnutzungsgrad  $\mu_0$  meistens kleiner ist als das Lastniveau  $\eta_{fi,t}$ , da  $\gamma_M$  normalerweise größer als  $\gamma_{M,fi}$  ist.

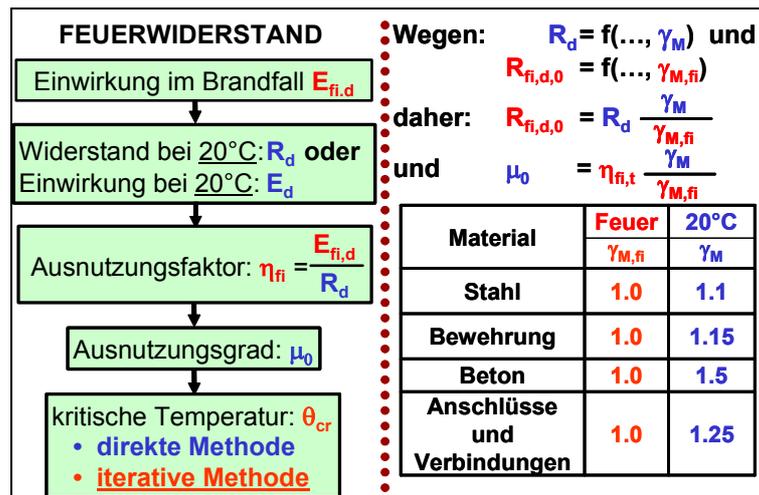


Abbildung 21 Anwendung des Bemessungsverfahrens über die kritische Temperatur

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, kann eine Iteration erforderlich sein, um die kritische Temperatur  $\theta_{cr}$  ermitteln zu können. Eine genauere Betrachtung einer Stahlstütze im Brandfall zeigt, wann eine Iteration nötig ist (siehe Abbildung 22).

- Bei einer kurzen Stütze, bei der kein Knickproblem auftritt, wird die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall durch  $N_{b,fi,t,Rd} = A k_{y,\theta_{max}} f_y / \gamma_{M,fi}$  bestimmt. In diesem Fall ist die Temperaturabhängigkeit nur über den Reduktionsfaktor für die Festigkeit  $k_{y,\theta}$  gegeben.
- Bei schlanken knickgefährdeten Stützen wird die Normalkrafttragfähigkeit im Brandfall durch  $N_{b,fi,t,Rd} = \chi(\lambda_{\theta}) A k_{y,\theta_{max}} f_y / \gamma_{M,fi}$  bestimmt. In diesem Fall hängt die Tragfähigkeit sowohl von dem Reduktionsfaktor für die Festigkeit  $k_{y,\theta}$  als auch von der Schlankheit im Brandfall  $\bar{\lambda}_{\theta}$  ab. Diese Schlankheit hängt nicht nur von der Festigkeit über  $k_{y,\theta}$  ab sondern auch von der Steifigkeit, ausgedrückt durch  $k_{E,\theta}$ , denn es gilt  $\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$ . Unter diesen Umständen ist es nicht mehr möglich die kritische Temperatur  $\theta_{cr}$  direkt zu berechnen und eine Iteration (maximal zwei Iterationsschritte) muss durchgeführt werden.

Um eine Iteration zu vermeiden, besteht die Möglichkeit einen festen auf der sicheren Seite liegenden Wert für  $[k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$  anzunehmen, so dass  $\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} [k_{y,\theta} / k_{E,\theta}]^{0.5}$  nicht mehr temperaturabhängig ist. Somit kann die kritische Temperatur  $\theta_{cr}$  auch bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen direkt ermittelt werden.

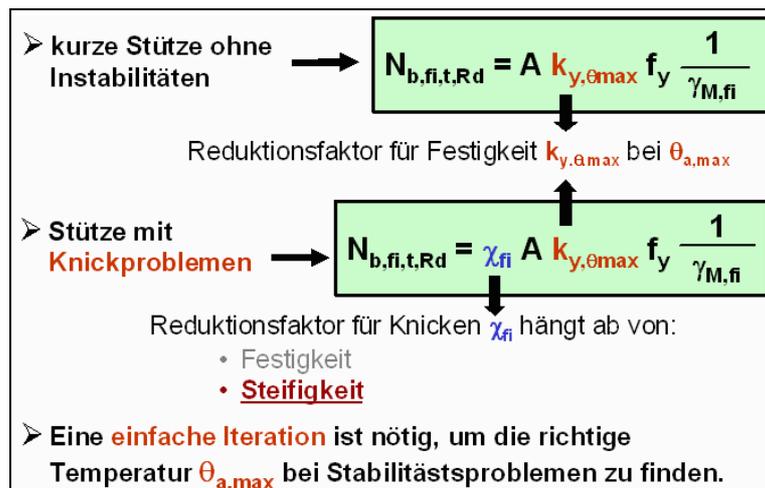


Abbildung 22 Verwendung einer direkten und indirekten Berechnung der kritischen Temperatur

### 3.4 Allgemeine Berechnungsverfahren

Allgemeine Berechnungsverfahren können prinzipiell für jede Art von mechanischer Tragwerksanalyse im Brandfall verwendet werden. Folgende Punkte sind jedoch zu berücksichtigen:

- Allgemeine Berechnungsverfahren, die das mechanische Verhalten abbilden, sollten auf den akzeptierten Gesetzmäßigkeiten und Annahmen der Mechanik (inklusive des Materialverhaltens bei erhöhten Temperaturen) basieren.
- Alle potenziellen Versagensfälle, die durch das allgemeine Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt werden (inklusive lokales Beulen und Schubversagen) müssen durch geeignete Hilfsmittel ausgeschlossen werden, z.B. indem bei einer numerischen Analyse Balkenelemente verwendet werden
- Bei allgemeinen Berechnungsverfahren dürfen jegliche Temperaturkurven unter der Voraussetzung verwendet werden, dass die Materialeigenschaften für den Temperaturbereich bekannt sind.
- Die Auswirkungen von temperaturinduzierten Spannungen und Dehnungen auf Grund von Temperaturanstieg und -gradienten sollten berücksichtigt werden.
- Das mechanische Modell sollte weiterhin berücksichtigen:
  - kombinierte Einflüsse aus mechanischen Einwirkungen, geometrischen Imperfektionen und thermische Einwirkungen
  - temperaturabhängige Materialeigenschaften entsprechend Abschnitt 3
  - geometrisch nichtlineare Effekte
  - nichtlineare Werkstoffeigenschaften, inklusive der ungünstigen Einflüsse auf die Steifigkeit durch Be- und Entlastung eines Bauteils

Ein typisches Beispiel für die Verwendung von allgemeinen Berechnungsverfahren ist die Analyse eines Verbundträgers mit einem Wabenprofil im Brandfall (siehe Abbildung 23). Die Notwendigkeit der Anwendung eines allgemeinen Berechnungsverfahrens besteht in der Tatsache, dass dieser Träger durch kein vereinfachtes Berechnungsverfahren der Eurocodes abgedeckt ist. Derzeit ist der einzige Weg diesen Träger zu berechnen die Verwendung eines allgemeinen Berechnungsverfahrens. Es ist jedoch erforderlich, die Berechnung mit Versuchsergebnissen zu validieren, nicht nur in Bezug auf das globale Tragverhalten (Durchbiegung, Versagenszeit, ...), sondern auch auf lokale Effekte. In Abbildung 23 ist erkennbar, dass durch geeignete numerische Modelle das Versagen bei Bauteilen im Brandfall simuliert werden kann.

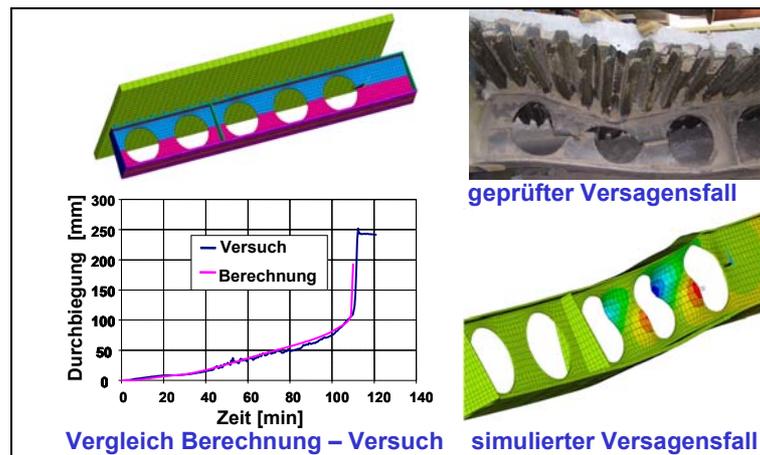


Abbildung 23 Anwendungsbeispiel für allgemeines Berechnungsverfahren im Brandfall (Wabenträger)

## 4 BESCHREIBUNG DER GLOBALEN TRAGWERKSANALYSE

### 4.1 Allgemeine Anwendungsregeln zur brandschutztechnischen Bemessung globaler Tragwerke

Eine globale Tragwerksanalyse wird mehr und mehr im Brandschutzingenieurwesen angewendet. Der Eurocode bietet genaue Regelungen für diese Art der Analyse. Hinsichtlich der Analyse des mechanischen Verhaltens sind folgende Punkte zu beachten:

- Eine globale Tragwerksanalyse erfordert meistens die Anwendung von allgemeinen Berechnungsverfahren.
- Es ist wichtig ein passendes Konzept zur Tragwerksmodellierung zu wählen (Größe, Art, ...).
- Die vorhandenen Randbedingungen müssen richtig abgebildet werden.
- Die Belastungssituation des modellierten Tragwerks muss mit der Belastungssituation im Brandfall übereinstimmen.
- Die implementierten Materialmodelle müssen dem realen Materialverhalten unter erhöhten Temperaturen entsprechen
- Bei der Modellierung von Teiltragwerken sind die Randbedingungen, die durch den unmodellierten Teil des Tragwerks gegeben sind, korrekt abzubilden.
- Es ist wichtig, die Berechnungsergebnisse kritisch zu überprüfen, insbesondere der Versagensgrund.
- Eine Überprüfung der in der Berechnung unberücksichtigten Eigenschaften ist notwendig, um eine Übereinstimmung des numerischen Modells mit Konstruktionsdetails sicherzustellen.

Alle oben genannten Punkte werden im Detail in dem folgenden Anwendungsbeispiel einer globalen Tragwerksanalyse im Brandfall genauer beschrieben.

### 4.2 Anforderungen an allgemeine Berechnungsverfahren für die Tragwerksanalyse von Stahl- und Stahlverbundtragwerken

Bei der Anwendung einer globalen Tragwerksanalyse auf Stahl- und Stahlverbundtragwerke sind folgende Punkte zu beachten:

- - Bezüglich der Werkstoffmodelle ist zu berücksichtigen:

- Die Dehnung setzt sich unter erhöhten Temperaturen aus mehreren Komponenten zusammen
- Kinematische Materialmodelle für die Abbildung der Temperaturentwicklung
- Festigkeitseigenschaften von bestimmten Materialien (z.B. Beton) für die Abkühlungsphase
- Eine transiente Erwärmung von Tragwerken im Brandfall erfordert ein iteratives Lösungsverfahren und keine stationäre Analyse einer gegebenen Zeit
- Die bestehenden Randbedingungen müssen richtig abgebildet werden
- Die Belastungssituation des modellierten Tragwerks muss mit der Belastungssituation im Brandfall übereinstimmen
- Die implementierten Materialmodelle müssen dem realen Materialverhalten unter erhöhten Temperaturen entsprechen
- Bei einer allgemeinen numerischen Berechnung von Stahl- und Stahlverbundtragwerken im Brandfall müssen einige bestimmte Eigenschaften, die sonst unberücksichtigt bleiben, mit besonderer Beachtung modelliert werden, wie z.B. das Reißen von Bewehrung durch übermäßige Dehnung, Reißen und Stauchen von Beton, Tragfähigkeit von Verbindungen, Tragfähigkeit der Verbundfuge, usw.

#### 4.2.1 *Zusammensetzung der Dehnung in Werkstoffmodellen für allgemeine Berechnungsverfahren*

In allgemeinen Berechnungsmodellen zur globalen Tragwerksanalyse von Stahl- und Stahlverbundtragwerken ist zu berücksichtigen, dass die Dehnung eines Bauteils im Brandfall aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt ist und durch folgende Beziehung ausgedrückt werden kann (siehe auch Abbildung 24):

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{th} + (\varepsilon_\sigma + \varepsilon_c + \varepsilon_{tr}) + \varepsilon_r$$

Dabei sind:

- $\varepsilon_t$  die resultierende Dehnung
- $\varepsilon_{th}$  thermische Dehnung
- $\varepsilon_\sigma$  Dehnung infolge Spannungen
- $\varepsilon_c$  Kriechdehnung bei erhöhten Temperaturen
- $\varepsilon_{tr}$  Dehnung infolge instationärer und ungleichmäßiger Erwärmung von Beton
- $\varepsilon_r$  Dehnung infolge von Eigenspannungen (meistens bei Stahlquerschnitten)

In den Eurocodes werden die Kriechdehnung und die Dehnung infolge instationärer Erwärmung implizit in den Spannungs-Dehnungsbeziehungen der entsprechenden Werkstoffe bei erhöhten Temperaturen berücksichtigt. Die Dehnung infolge Eigenspannungen wird, bis auf gewisse Ausnahmen, im Allgemeinen vernachlässigt.

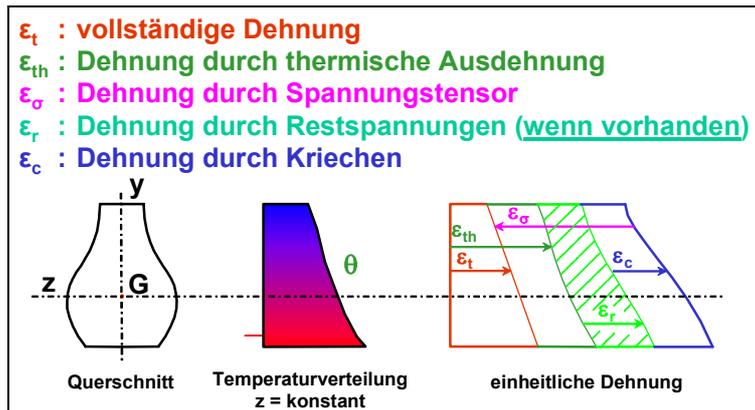


Abbildung 24 Zusammensetzung der Dehnung bei Werkstoffmodellen in allgemeinen Berechnungsverfahren

#### 4.2.2 Kinematisches Materialmodell unter Berücksichtigung der Temperaturentwicklung

Die Temperaturfelder von Bauteilen im Brandfall sind zeitabhängig. Zusätzlich sind alle Materialeigenschaften mehr oder weniger temperaturabhängig. So verändern sich während eines Brandes ständig die Eigenschaften der im Tragwerk verwendeten Materialien. Dieses Materialverhalten ist in allgemeinen Berechnungsverfahren durch kinematische Materialmodelle zu berücksichtigen. Die beiden im Stahl- und Stahlverbundbau am häufigsten verwendeten Materialien Stahl und Beton verhalten sich sehr verschieden und es werden unterschiedliche kinematische Regeln angewendet (siehe Abbildung 25).

Bei einer Veränderung der Spannungs-Dehnungskurve durch Temperaturänderungen im Stahl verbleibt ein konstanter Anteil an plastischer Dehnung zwischen zwei Temperaturzuständen. Dies gilt unabhängig von der Spannungsrichtung (Zug oder Druck).

Bei dem Beton ist die Beschreibung des Materialverhaltens bei Temperaturänderungen komplizierter, da das Material zusätzlich ein unterschiedliches Verhalten bei Druck- und Zugspannungen aufweist. Es müssen demnach für die unterschiedlichen Spannungsrichtungen unterschiedliche Regeln verwendet werden.

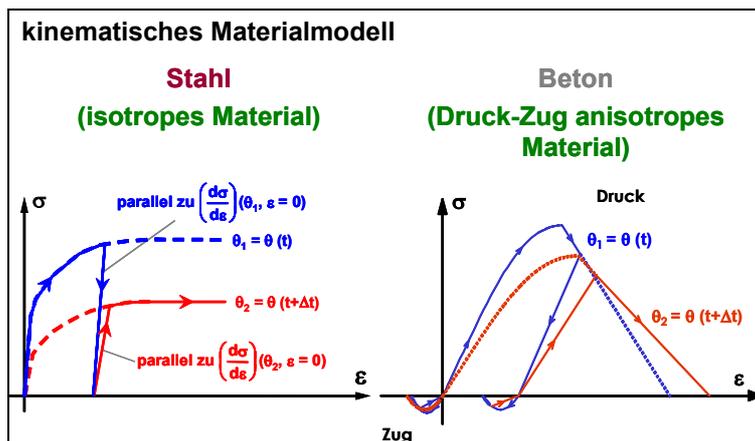


Abbildung 25 Kinematisches Werkstoffmodell zur Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Temperatur

Im Allgemeinen sind diese Werkstoffmodelle in speziellen allgemeinen Berechnungsmodellen für den Brandfall bereits implementiert. Es ist allerdings wichtig zu wissen, wie diese Materialmodelle angewendet werden können.

#### 4.2.3 Prinzip eines iterativen Lösungsverfahrens bei allgemeinen Berechnungsverfahren

Im Allgemeinen wird eine Tragwerksbemessung im Brandfall anhand einer Tragfähigkeitsanalyse durchgeführt, in dem eine Gleichung aufgestellt wird in der sich die Tragfähigkeit und die Belastung gegenüber stehen. Allerdings treten im Brandfall große plastische Verformungen durch Erweichung und thermischer Dehnung des Materials auf. Somit ist die allgemeine Brandanalyse nicht mehr linear-elastisch sondern nichtlinear elasto-plastisch, wobei sich die Festigkeit und die Steifigkeit nichtlinear verhalten. Aus mathematischer Sicht kann die Lösung einer solchen Analyse nicht mehr direkt ermittelt werden, sondern muss nach folgendem Verfahren erfolgen (vgl. Abbildung 26):

- inkrementelle Analyse um den Gleichgewichtszustand eines Tragwerks unter verschiedenen Umständen (wie verschiedene Temperaturfelder) zu ermitteln.
- In jedem Zeitschritt ist eine Iteration durchzuführen um den Gleichgewichtszustand des elasto-plastischen Tragverhaltens des Tragwerks zu ermitteln.

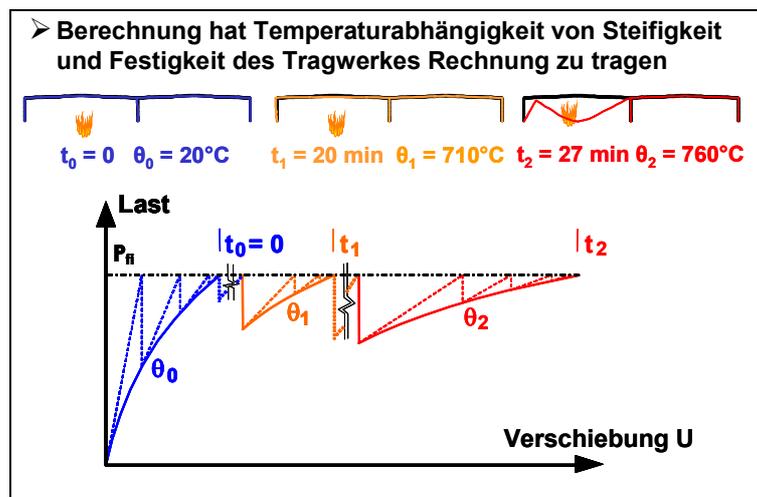


Abbildung 26 Vorgehensweise bei einer iterativen Lösungsprozedur in allgemeinen Berechnungsverfahren

#### 4.2.4 Mechanisches Verhalten von Beton in der Abkühlphase

Ein weiterer Punkt, den es bei der Anwendung von allgemeinen Berechnungsmodellen auf Stahl- und Stahlverbundtragwerken unter Naturbrandbedingungen zu berücksichtigen gilt, ist das Materialverhalten während der Abkühlphase. Die Eigenschaften des Stahls nehmen nach Erwärmung und Abkühlung wieder Ihren Ausgangswert an. Bei dem Beton ist diese positive Eigenschaft nicht zu beobachten. Nach Erwärmung und Abkühlung kann der Beton seine Ausgangsfestigkeit nicht mehr erreichen. Es kann sogar sein, dass die Festigkeit geringer ist als zum Zeitpunkt der maximalen Erhitzung. Im EN 1994-1-2 wird diesem Verhalten Rechnung getragen (vgl. Abbildung 27). Danach wird die Festigkeit des Betons bei einer Erwärmung über  $300^\circ\text{C}$  nach dem Abkühlen um weitere 10 % (zusätzlich zur Reduzierung bei der maximalen Temperatur) abgemindert. Dieses Verhalten gilt es zu berücksichtigen, da es bedeuten kann, dass ein Tragwerk während der Abkühlphase versagen kann.

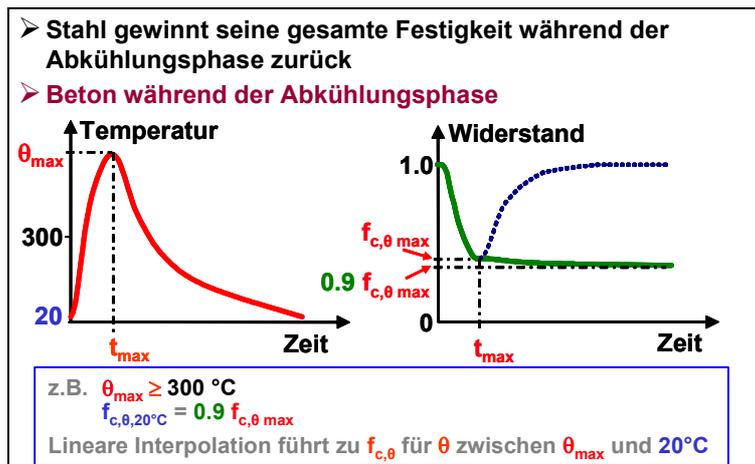


Abbildung 27 Mechanisches Verhalten von Beton in der Abkühlungsphase

#### 4.3 Anwendungsbeispiel einer globalen Tragwerksanalyse eines Stahl- und Stahlverbundtragwerks

##### 4.3.1 Beschreibung des untersuchten Tragwerks

Nachdem die Anforderungen an die Anwendung eines allgemeinen Berechnungsverfahrens auf eine globale Tragwerksanalyse erläutert wurden, werden im Folgenden diese Regeln auf ein Beispiel angewendet. Das gewählte Beispiel ist ein 2-stöckiges Stahl- und Verbundtragwerk aus einem Verbunddeckensystem (Stahlverbundträger ohne Kammerbeton mit Verbunddecken) und Stahlstützen. Das Tragwerk hat folgende Abmessungen:

- Stützweite der Nebenträger: 15 m
- Stützweite des Hauptträgers: 10 m
- Stützweite der Verbunddecke: 3.33 m
- Höhe des ersten Geschosses: 4.2 m
- Höhe des zweiten Geschosses: 3.2 m

Im Brandfall wird eines der Stockwerke lokal auf einer Fläche von 5 m x 12 m (60 m<sup>2</sup>) einem Naturbrand ausgesetzt.

Statt einer nominellen Brandkurve (z.B. der Einheits-Temperaturzeitkurve) wird eine Naturbrandkurve gewählt.

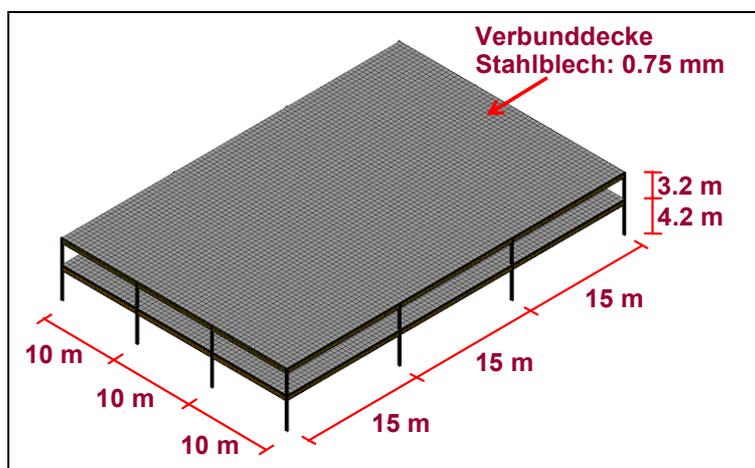


Abbildung 28 Beispiel eines Stahlverbundtragwerks

In diesem Beispiel wird nur das mechanische Verhalten des Tragwerks beschrieben. Dinge wie Brandszenarien, Brandentwicklung oder thermisches Verhalten des Tragwerks werden hier vernachlässigt.

#### 4.3.2 Wahl des Tragwerksmodells und Detailmodellierung

Für die Abbildung dieses Tragwerks unter Naturbrandbeanspruchung existieren zwei Möglichkeiten der Modellierung für eines allgemeines Berechnungsverfahren: Entweder als 2D Verbundrahmen- oder als komplexeres 3D Verbunddeckenmodell. Es ist notwendig, sich zwischen diesen beiden Modellen zu entscheiden. Zunächst folgt eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beider Modelle:

- 2D Rahmenmodell aus Balkenelementen:
  - Lastumlagerungen innerhalb des Verbundträgers sind möglich
  - Der Membraneffekt der Verbunddecke zwischen benachbarter Träger bleibt unberücksichtigt
  - Es sind mehrere numerische Simulationen für ein Brandereignis erforderlich
  - Der Rechenaufwand für jede Simulation ist gering
- 3D Deckenmodell aus Schalen-, Balken- und Verbindungselementen:
  - Der Membraneffekt wird über die gesamte Verbunddeckenkonstruktion berücksichtigt.
  - Eine Lastumlagerung wird durch Schalenelemente ermöglicht.
  - Es ist nur eine numerische Simulation für ein Brandereignis erforderlich.
  - Der Rechenaufwand ist hoch, da die erforderliche Anzahl an Elemente viel höher ist, als bei dem 2D Modell.

Bei einem Vergleich der beiden Modelle ist zu erkennen, dass das 2D Modell effizienter ist (weil die Rechenzeit geringer ist), jedoch wichtige Vorteile von Verbunddecken bei lokaler Brandbeanspruchung (Membranwirkung) vernachlässigt werden. Dies kann dazu führen, dass das Tragwerk überdimensioniert ist oder Brandschutzbekleidung erforderlich wird. Aus diesen Gründen wird das 3D Modell bevorzugt.

Allerdings ist zu überprüfen, in wie weit solche komplizierten Berechnungsmodelle der Realität entsprechen. Das hier verwendete 3D Modell wurde z.B. durch diverse reale Naturbrandversuche von verschiedenen ECSC Forschungsprojekten vollständig validiert.

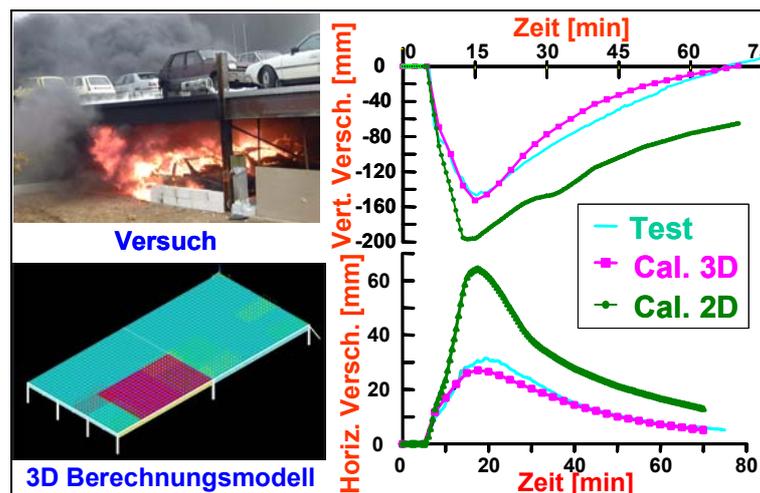


Abbildung 29 Gültigkeit eines 3D-Modells eines Verbunddeckensystems

Ein typischer Validierungsfall ist ein Naturbrandversuch in einem offenen Parkhaus (vgl. Abbildung 29). Das 3D-Modell liefert dabei bessere und realistischere Ergebnisse als das 2D-Modell. Bei der Anwendung von 3D-Modellen ist es besonders wichtig, sich über den Umfang des 3D-Modells Gedanken zu machen, da eine vollständige Modellierung eines

Verbundtragwerks meistens eine zu hohe Rechenzeit erfordert (bis zu Wochen oder Monate bei der Verwendung von üblichen Computern).

Bei dem in Abbildung 30 dargestellten Modell unter lokaler Brandbeanspruchung besteht die Möglichkeit, das Modell auf einen Abschnitt zu reduzieren und damit einer der drei in den Eurocodes angebotenen Tragwerksanalysen zu entsprechen, nämlich der Analyse von Teiltragwerken. Der Abschnitt soll für das numerische Modell so klein wie möglich gewählt werden. Es wird ein Stockwerk mit einer Fläche von  $15\text{ m} \times 20\text{ m} = 300\text{ m}^2$  abgebildet anstatt die gesamten zwei Stockwerke mit einer Grundfläche von  $45\text{ m} \times 30\text{ m} = 1350\text{ m}^2$ .

Zusätzlich zu der oben durchgeführten Wahl eines Teiltragwerks ist die Modellierung der Details zu beachten. Die Verbunddecke wurde mit folgenden finiten Elementen abgebildet:

- Schalenelemente für den Beton einschließlich Bewehrung
- Balkenelementen für die Stahlprofile, das Profilblech und die Rippen der Verbunddecke
- Verbindungselemente für die vollständige Verdübelung von Stahlträger und Verbunddecke

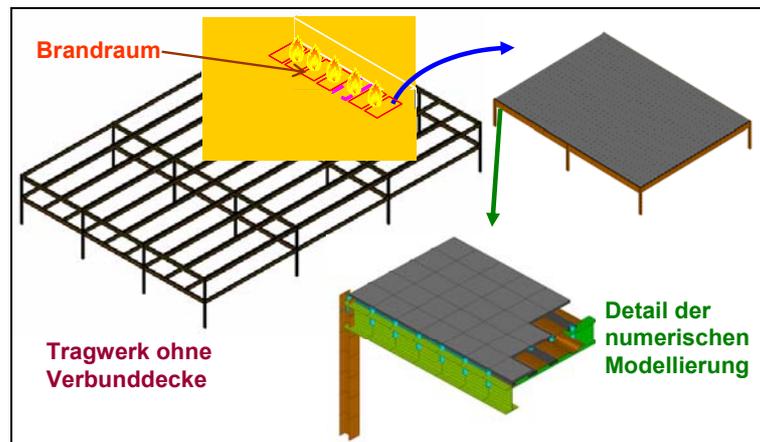


Abbildung 30 Wahl eines Teiltragwerks in einem allgemeinen Berechnungsverfahren

#### 4.3.3 Lasten und Randbedingungen

Nach der Wahl des Teiltragwerkes müssen für die Bemessung im Brandfall folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Belastungssituation des Tragwerks
- Randbedingungen des modellierten Teiltragwerks

Bei der Kaltbemessung wird das Tragwerk durch folgende Lasten beansprucht:

- Eigengewicht (inklusive Ausbaulasten): **G**
- Verkehrslasten: **Q**
- Windlasten: **W**
- Schneelasten: **S**

Im Brandfall ist durch verschiedene Lastkombinationen der ungünstigste Lastfall zu ermitteln. Da die räumliche Steifigkeit durch verschiedene Aussteifungssysteme sicher gestellt ist, kann die Beanspruchung der Decke durch die Windlast vernachlässigt werden. Demnach entstehen folgende Kombinationsmöglichkeiten für die Eigenlast **G**, die Verkehrslast **Q** und die Schneelast **S**:

- $G + \Psi_{1,1}Q + \Psi_{2,1}S = G + 0.7Q + 0.0S = G + 0.7Q$
- $G + \Psi_{1,1}S + \Psi_{2,1}Q = G + 0.6Q + 0.2S$

Bei den o.g. Lastkombinationen ist für das betrachtete Teiltragwerk die erste Kombination am ungünstigsten, da sie zu den größten Beanspruchungen im Tragwerk führt.

Bei Betrachtung der Randbedingungen lässt sich feststellen, dass das modellierte Teiltragwerk keinen besonderen Anfangsbedingungen unterliegt. Durch das Herauslösen des Teiltragwerks aus dem Gesamttragwerk entstehen jedoch Zwangsbedingungen, die von dem unmodellierten Teil des Tragwerks verursacht werden. Diese Zwangsbedingungen werden durch folgende Randbedingungen abgebildet (siehe auch Abbildung 31):

- Volleinspannung der Stützen, da diese über mehrere Stockwerke verlaufen und die unteren Stockwerke kalt bleiben.
- Verdrehung und horizontale Verschiebung der Decke werden auf Grund der durchlaufenden Deckenplatte verhindert.

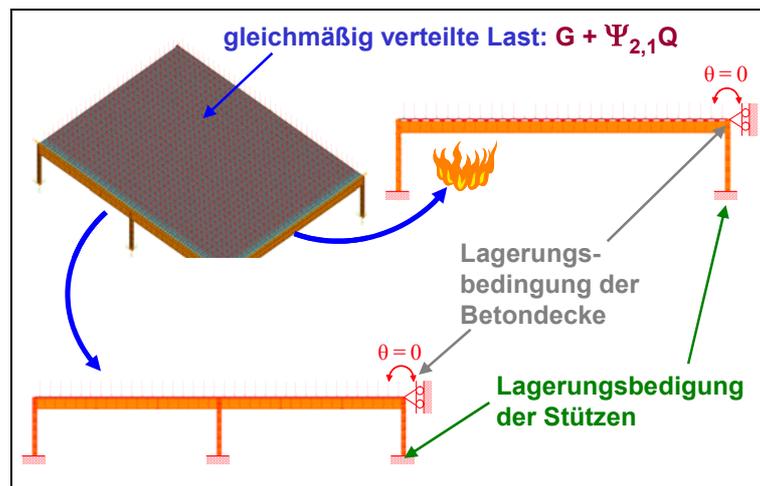


Abbildung 31 Aufbringen von mechanischen Lasten und Randbedingungen bei der Modellierung von Teiltragwerken

#### 4.3.4 Auswertung der numerischen Ergebnisse

Mit dem modellierten Teiltragwerk lassen sich über die numerische Simulation Untersuchungen des Tragwerksverhaltens im Brandfall durchführen. Abbildung 32 zeigt die numerischen Ergebnisse in Form von Durchbiegungen der Decke zu zwei verschiedenen Zeitpunkten. Aufgrund der lokalen Naturbrandbeanspruchung lassen sich die Auswirkungen des Brandverlaufs auf die Durchbiegungen beobachten. Die maximale vertikale Durchbiegung wächst von 140 mm nach 20 min auf 310 mm nach 40 min an.

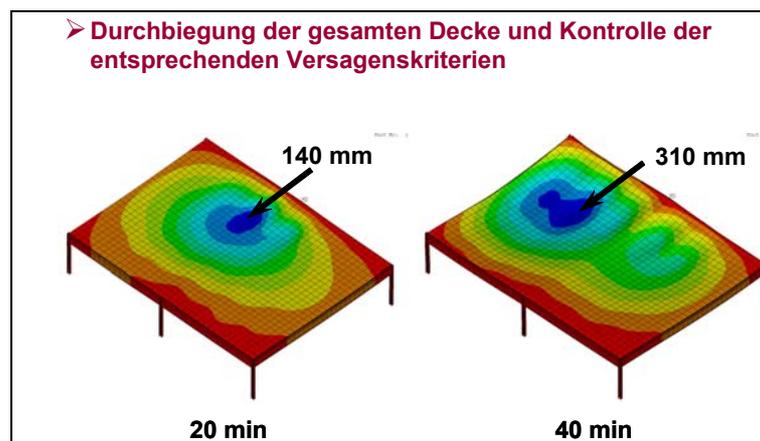


Abbildung 32 Analyse der numerischen Ergebnisse des globalen mechanischen Tragverhaltens der modellierten Struktur

Nach 60 min Brandeinwirkung verringert sich die maximale Durchbiegung wieder auf 230 mm, die verformte Fläche wächst jedoch auf Grund der Brandausbreitung. Das Abfallen der

maximalen Durchbiegung entsteht, da die maximale Erwärmungstemperatur überschritten ist der Brand sich in der Abkühlphase befindet (siehe Abbildung 33).

Bei Betrachtung der maximalen Durchbiegung der Stahlträger fällt auf, dass die Nebenträger sich nur um 280 mm und die Hauptträger um 110 mm durchbiegen. Dies ist weit von dem definierten Versagenskriterium entfernt, was bei einer Durchbiegung von  $1/20$  der Stützweite liegt. Unter diesem Gesichtspunkt weist das Tragwerk mit dem angewendeten Brandszenario ein befriedigendes Verhalten auf.

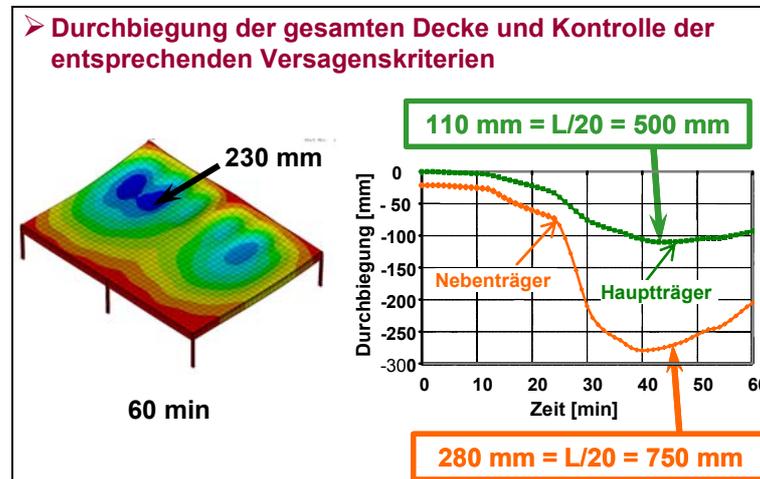


Abbildung 33 Kontrolle der Durchbiegung als Versagenskriterium

Als weiteres Versagenskriterium für das modellierte Tragwerk muss die Dehnung der Bewehrung in der Verbunddecke untersucht werden (siehe Abbildung 34). Es wurde vorausgesetzt, dass die maximale Dehnung der Bewehrung 5 % nicht überschreiten darf. Dies entspricht der minimalen Dehnungskapazität aller Bewehrungsstähle nach EN 1992-1-2 (Brandschutzteil für Betontragwerke). Weiterhin wurde dieser Versagensfall in zwei ECSC Projekten über numerische Modellierung von Brandversuchen in realen Gebäuden validiert (siehe Literatur).

Bei diesem Beispiel beträgt die maximale Dehnung der Bewehrung in der numerischen Simulation 1,4 %, ist also deutlich kleiner als 5 %. Somit ist auch dieses Versagenskriterium erfüllt.

Die oben beschriebene globale Tragwerksanalyse unter Verwendung von allgemeinen Berechnungsmodellen wurde in verschiedenen ECSC Projekten im Zusammenhang mit Großmaßstäblichen Versuchen von Stahl- und Stahlverbundtragwerken im Brandfall verwendet. Es hat sich gezeigt, dass gute Übereinstimmungen zwischen den Versuchen und den Simulationen erzielt werden konnten (siehe Referenzen).

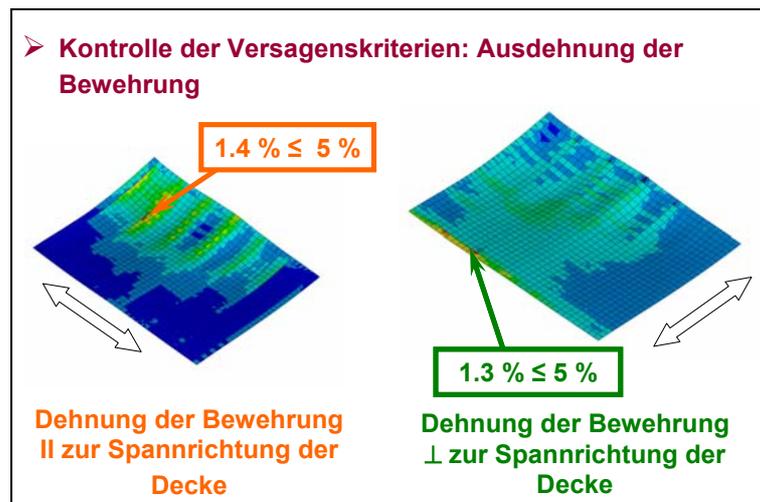


Abbildung 34 Kontrolle der Bewehrungsdehnung als Versagenskriterium

#### 4.3.5 Anforderung an Konstruktionsdetails für eine folgerichtige und brauchbare Umsetzung des numerischen Modells

Parallel zur numerischen Analyse ist es wichtig, Konstruktionsdetails so zu planen, dass sie mit den Annahmen in der numerischen Analyse übereinstimmen. Für das Beispiel werden folgende Konstruktionsdetails benötigt (siehe Abbildung 35):

- Mechanische Verbindung zwischen Rand- und Eckstützen und der Verbunddecke mittels zusätzlicher Bewehrungsstäbe um den Feuerwiderstand an den Rändern zu erhöhen.
- Ein schmaler Spalt zwischen den Unterflanschen der Träger und der Stütze, so wie zwischen den Unterflanschen der Haupt- und Nebenträger, um im Brandfall ein Stützmoment aktivieren zu können.
- Einfache Verbindungen zwischen den Trägern und zwischen Träger und Stütze auf Grund der o.g. Anforderungen.
- Vollständige Schubübertragung in der Verbundfuge

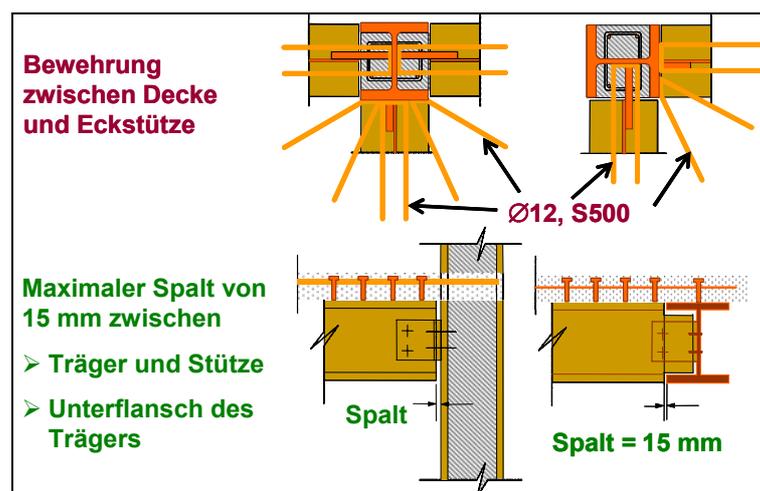


Abbildung 35 Konsistenz zwischen dem numerischen Modell und Konstruktionsdetails

#### 4.3.6 Beispiel eines Gebäudes, das über eine globale Tragwerksanalyse nachgewiesen wurde

Abbildung 36 zeigt ein in Frankreich gebautes Parkhaus, das mittels globaler Tragwerksanalyse über ein allgemeines Berechnungsverfahren und Naturbrandeinwirkung bemessen wurde.

Bei diesem Gebäude wurden verschiedene Brandszenarien ermittelt, und für jedes Brandszenario wurde ein allgemeines Berechnungsmodell entwickelt. Dabei wurden die Versagenskriterien der maximalen Durchbiegung und der maximalen Dehnung der Bewehrung sorgfältig überprüft.

Die Anwendung dieser Ingenieurmethoden führte in Frankreich zu dem ersten Gebäude dieser Größe, dass mit unbleidtem Stahl ausgeführt wurde.



Abbildung 36 Anwendungsbeispiel für die Brandschutzbemessung mit einer globalen Tragwerksanalyse unter Naturbrandbeanspruchung

## 5 BESONDERHEITEN VON STAHL- UND STAHLVERBUNDTRAGWERKEN IM BRANDFALL

Das oben vorgestellte Beispiel hat gezeigt, dass bei der Bemessung von Stahl- und Stahlverbundtragwerken im Brandfall ein besonderes Augenmerk auf folgende Konstruktionsdetails zu werfen ist:

- Anschlussdetails
- Verbundfuge zwischen Stahl und Beton

Bei einer brandschutztechnischen Bemessung mittels der globalen Tragwerksanalyse ist die Integrität des Tragwerks sicherzustellen. Ist dies nicht der Fall, treffen die Grundlagen dieser Art der Analyse nicht mehr zu. Weiterhin ist unter keinen Umständen ein globales Versagen des Tragwerks aufgrund des Versagens von Verbindungselementen akzeptabel.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das Versagen von Verbindungen in der Abkühlphase. Dies ist nicht nur für die globale Tragwerksanalyse unter Naturbrandbeanspruchung zu beachten, bei der sich ein Teil des Tragwerks noch in der Erwärmungsphase befindet während ein anderer Teil am abkühlen ist, sondern auch für die Bemessung unter Normbrandbedingungen, die das Verhalten unter realen Brandbedingungen ebenfalls berücksichtigen muss.

In EN 1993-1-2 (Brandschutzteil von Eurocode 3) und EN 1994-1-2 (Brandschutzteil von Eurocode 4), werden vereinfachte Berechnungsverfahren oder Verbindungsdetails für die brandschutztechnische Bemessung von Anschlüssen empfohlen. Ein typisches Beispiel ist die Verbindung zwischen Stütze und Träger im Verbundbau (siehe Abbildung 37). Es wird vorgeschlagen, einen schmalen Spalt zwischen dem Unterflansch des Stahlträgers und der Stahlstütze zu lassen. Dadurch werden im Kaltfall bei diesem Anschluss nur Querkräfte übertragen, da die Durchbiegungen im Kaltfall sehr gering sind. Im Brandfall führen sowohl temperaturbedingte Krümmungen als auch Steifigkeitsverluste zu einer bedeutenden Verdrehung über dem Auflager. Der schmale Spalt zwischen Unterflansch und Stütze schließt sich und es bildet sich zusammen mit der Bewehrung in der Betondecke ein Stützmoment in dem Träger aus, was seine Feuerwiderstandsdauer stark erhöht.

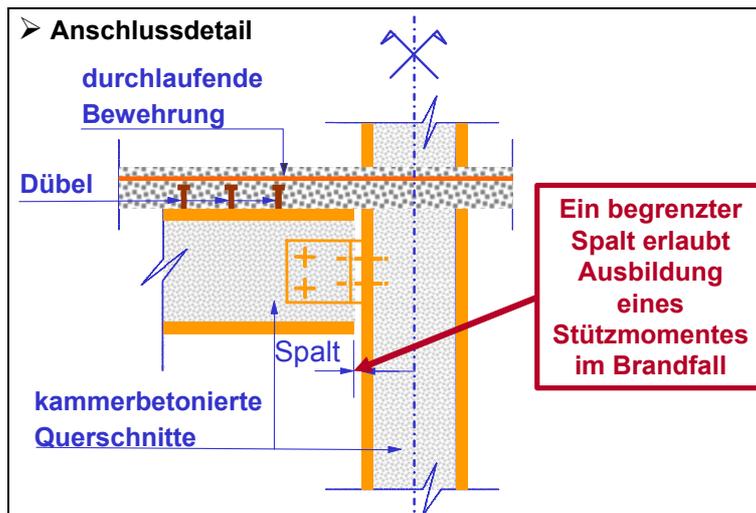


Abbildung 37 Beispiel eines Konstruktionsdetails für die Ausbildung eines Stützmomentes im Brandfall nach EN1994-1-2

Neben dem Verbund zwischen Stahlträger und Betondecke, ist ein anderes typisches Beispiel der Verbund zwischen Stahl und Beton bei kammerbetonierten Trägern. Um die Tragfähigkeit der Verbundmittel sicherzustellen, so dass die Zulagebewehrung im Kammerbeton voll mitwirken kann, empfiehlt die EN 1994-1-2 Konstruktionsdetails, wie sie in Abbildung 38 dargestellt sind. Diese Konstruktionsdetails dienen nicht nur der Sicherstellung der Kraftübertragung zwischen verschiedenen Teilen des Trägers, sondern sollen auch ein Abplatzen des Betons verhindern, was einen sehr negativen Einfluss auf des Tragverhalten auf den Beton hat, da durch das Freilegen der Bewehrung diese direkt dem Brand ausgesetzt sein würde.

Es gibt eine Menge an Konstruktionsdetails. Auf diese ist bei einer brandschutztechnischen Bemessung von Tragwerken besonders zu achten, um die bestmögliche Lösung für die Brandsicherheit von Stahl- und Stahlverbundtragwerken zu erzielen.

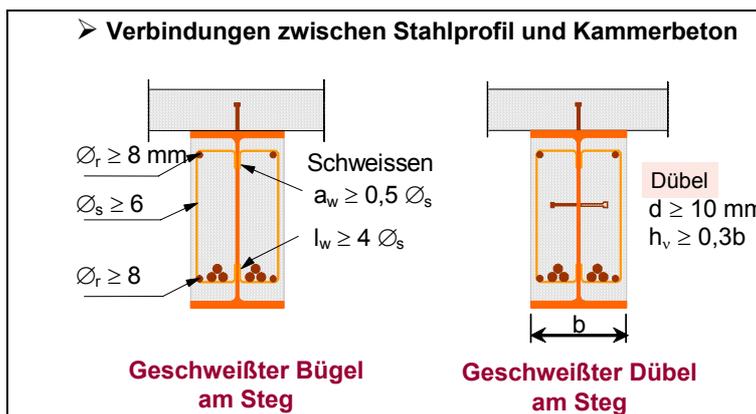


Abbildung 38 Beispiel eines Konstruktionsdetails für einen ausreichenden Verbund zwischen Stahl und Beton im Brandfall nach EN1994-1-2

## 6 REFERENCES

- EN1990: Eurocode 0: Basis of structural design, Brussels, CEN, July 2001
- EN1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General rules – Actions on structures exposed to fire, Brussels, CEN, November 2002
- EN1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, CEN, November 2003
- EN1994-1-2: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Actions on structures exposed to fire, Brussels, CEN, October 2003
- EN1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design, Brussels, CEN, December 2003
- 7215 SA125: Competitive steel buildings through natural fire safety concept, final report of CEC agreement 7210 – SA125, 126, 213, 214, 323, 423, 522, 623, 839, 937, British Steel, March 1999
- 7215 SA112: Design Tools of the behaviour of multi-storey steel framed buildings exposed to natural fire conditions (CARD (2)), Rapport final of ECSC project, TNO, January 2003
- 7215 PP025: Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings, final report of ECSC project-EUR 20466 EN 2002, CTICM, Brussels, December 2003